

Rzeszów 2025



## Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń .....	5
Wstęp.....	7
1. Determinanty wytrzymałości konstrukcyjnych połączeń klejowych .....	9
1.1 Opis zjawisk występujących w procesach klejenia .....	9
1.2 Czynniki mające wpływ na wytrzymałość statyczną połączeń klejowych .....	12
1.2.1 Rozkład naprężeń w obciążonych połączeniach klejowych o różnej geometrii.....	13
1.2.2 Uwarunkowania geometryczne wpływające na nośność połączeń klejowych.....	23
1.2.3 Wpływ właściwości klejów na właściwości mechaniczne połączeń klejowych .....	26
1.2.4 Modyfikacje konstrukcyjne elementów klejonych wpływające na poprawę ich wytrzymałości.....	45
1.3 Wytrzymałość oraz trwałość zmęczeniowa konstrukcyjnych połączeń klejowych .....	49
1.3.1 Wybrane metody badań wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych	49
1.3.2 Czynniki mające wpływ na trwałość zmęczeniową połączeń klejowych .....	52
1.3.3 Metody poprawy trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej połączeń klejowych.....	55
1.4 Wytrzymałość dynamiczna konstrukcyjnych połączeń klejowych .....	56
1.5 Zastosowanie Metody Elementów Skończonych (MES) do opisu zjawisk zachodzących w obciążonych połączeniach klejowych.....	58
2. Cel, hipoteza i zakres pracy .....	63
3. Analiza MES.....	67
3.1 Modelowanie 3D połączenia klejowego.....	69
3.2 Przygotowanie obiektu symulacji.....	71
3.3 Wyniki modelowania MES .....	76
4. Badania statyczne .....	92
4.1 Opis metodyki badań statycznych .....	92
4.2 Charakterystyka blach stosowanych w badaniach eksperymentalnych.....	93
4.3 Przygotowanie powierzchni do klejenia.....	97

4.4 Klejenie próbek .....	98
4.5 Badanie chropowatości i SEP .....	99
4.6 Wyniki badań wytrzymałościowych dla próbek ze stali S235JR .....	105
4.7 Wyniki badań wytrzymałościowych dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024 T3.	123
4.8 Wyniki analizy faktograficznej dla próbek ze stali S235JR .....	136
4.9 Wyniki analizy faktograficznej dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024 T3.....	138
4.10 Wyniki analizy statystycznej.....	141
4.10.1 Test t Studenta.....	141
4.10.2 Test ANOVA .....	144
4.10.3 Analiza regresji korelacji .....	148
4.10.4 Analiza Boxplot .....	157
5. Badania zmęczeniowe.....	159
5.1 Wyniki badań zmęczeniowych dla próbek ze stali S235JR.....	159
5.2 Wyniki analizy makroskopowej próbek ze stali S235JR.....	171
5.3 Wyniki badań zmęczeniowych dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3.....	177
5.4 Wyniki analizy makroskopowej próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3.....	188
Podsumowanie i wnioski .....	192
Bibliografia .....	196
Spis rysunków .....	205
Spis tabel .....	213
Streszczenie.....	218
Summary .....	220

## Wykaz ważniejszych oznaczeń

$R_t$	- wytrzymałość na ścinanie
$R_{t,śr}$	- wartość średnia wytrzymałości na ścinanie
$l_{gr}$	- graniczna długość zakładki
$\tau$	- naprężenia ścinające w spoinie klejowej
$\sigma$	- naprężenia normlane w próbce
$P$	- wartość nośności połączenia klejowego
$P_{śr}$	- wartość średnia nośności połączenia klejowego
$A_p$	- pole przekroju poprzecznego płaskownika
$\tau_{max}$	- maksymalne naprężenia ścinające występujące w spoinie,
$P_{max}$	- maksymalna siła rozciągająca próbkę,
$A_z$	- powierzchnia zakładki.
$\sigma_p$	- odchylenie standardowe nośności
$\sigma_{Rt}$	- odchylenie standardowe wytrzymałości na ścinanie
$N$	- liczba cykli niszczących
$lgN$	- logarytm liczby cykli
$\bar{N}$	- wartość średnia
$s$	- odchylenie standardowe
$Ws$	- współczynnik zmienności
$t_a$	- przedział ufności
$Z_o$	- wartość zmęczeniowa
$Sq$	- średnie kwadratowa wysokość powierzchni [ $\mu m$ ],
$Ssk$	- asymetria powierzchni
$Sku$	- kurtoza powierzchni
$Sp$	- maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni
$Sy$	- maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni
$Sz$	- maksymalna wysokość powierzchni
$Sa$	- średnia arytmetyczna wysokości powierzchni



## Wstęp

Połączenia klejowe są nieodzownym elementem wielu gałęzi przemysłu, takich jak motoryzacja, lotnictwo czy budownictwo. Dzięki wykorzystaniu klejów, możliwe jest łączenie różnorodnych materiałów, w tym metali, tworzyw sztucznych i kompozytów [1]. Kluczowym czynnikiem determinującym nośność takiego połączenia jest klej, który, choć nie jest elementem nośnym konstrukcji, pełni bardzo ważną rolę - jest materiałem, który przenosi naprężenia między elementami łączonymi. Jego właściwości wytrzymałościowe, elastyczne oraz odporność na różne czynniki zewnętrzne, takie jak temperaturę, wilgotność czy działanie środków chemicznych, mają bezpośredni wpływ na trwałość i nośność połączenia [2].

Klejenie jest metodą trwałego łączenia elementów w różnych konstrukcjach. Połączenia klejowe coraz częściej znajdują zastosowanie w wielu branżach współczesnego przemysłu m.in. konstrukcyjno-budowlanej, lotniczej, motoryzacyjnej i maszynowej [5]. Poprzez rozwój techniki oraz technologii wykonania połączeń klejowych metoda klejenia zyskuje coraz większą popularność wśród konstruktorów. Klejenie materiałów konstrukcyjnych znajduje coraz większe zastosowanie we współczesnej technice [1]. Klejenie ulega systematycznemu rozwojowi poprzez wprowadzanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych połączeń klejowych, udoskonalenia stosowanych klejów i sposobów przygotowania powierzchni elementów klejowych, tak, aby wytrzymałość i trwałość wskazanych połączeń była jak najwyższa [3,4].

Coraz częstsze sięganie inżynierów do technologii klejenia wynika z wielu zalet połączeń klejowych [6], między innymi przyczynia się do zmniejszenia masy konstrukcji oraz daje możliwość łączenia różnych materiałów. Dodatkową zaletą połączeń klejowych jest możliwość łączenia elementów nie tylko o różnych właściwościach fizycznych i mechanicznych jak również o dowolnych kształtach i wymiarach. Korzyścią w zastosowaniu połączeń klejowych jest odporność na korozję, która występuje podczas łączenia metali innymi sposobami, zdolność tłumienia drgań czy też wykorzystanie właściwości uszczelniających. Należy również zwrócić uwagę na niskie koszty jednostkowe tej technologii, co wiąże się z niskimi kosztami produkcji lub montażu konstrukcji. Technologia klejenia nie potrzebuje wykonywania otworów, dzięki czemu zmniejsza się ryzyko osłabienia materiału. Występuje bardziej równomierny rozkład naprężeń niż w przypadku innych połączeń, np. śrubowych czy nitowanych, gdzie naprężenia koncentrują się wokół otworów. Dzięki temu połączenie klejowe jest bardziej odporne na wibracje lub deformacje. Porównując połączenie klejowe

z połączeniem spawanym, klejenie nie wywołuje zmian strukturalnych w materiale oraz w miejscu łączenia nie występuje wysoka temperatura, która może powodować odkształcenia cieplne [7].

Metoda klejenia nie jest pozbawiona wad. Jedną z nich jest niewielka odporność kleju na wahania temperatury, która wpływa na wytrzymałość połączeń, długi czas utwardzania klejów oraz możliwość rozwarstwiania się połączeń pod wpływem obciążeń [5]. Problematyczna bywa także konieczność odpowiedniego przygotowania elementów do sklejenia, która jest niezbędnym warunkiem do osiągnięcia pożądanej nośności połączenia klejowego [8]. W przypadku połączeń klejowych ważnym aspektem działającym na niekorzyść jest zjawisko starzenia, polegające na pogorszeniu się właściwości skleiny z czasem [9].

Na proces technologii klejenia składa się kilka operacji, które charakteryzują się określonymi parametrami [10-11]. Dobór technik i metod wykonywania poszczególnych operacji zależy od wielu czynników tj.: rodzaju łączonych materiałów i jego właściwości, rodzaju kleju (sposób utwardzania i właściwości), cech konstrukcyjnych połączenia: wymiary, kształt, rodzaj połączenia, rodzaj produkcji oraz metoda montażu i warunki montażowe, a także dobór oprzyrządowania i maszyn stosowanych podczas wykonywania połączeń klejowych [8].

Proces klejenia rozpoczyna się od przygotowania powierzchni do klejenia. Jest to istotne dla zapewnienia odpowiedniej przyczepności i trwałości połączenia. Przygotowanie powierzchni obejmuje czyszczenie i odtłuszczenie, aby usunąć zanieczyszczenia mogące zakłócić adhezję. W celu zwiększenia chropowatości powierzchni stosuje się m.in. piaskowanie, szczotkowanie, obróbkę chemiczną i wiele innych. Wybór techniki zależy od rodzaju materiału i oczekiwanych wyników [3]. Kleje epoksydowe są jednym z najpopularniejszych klejów stosowanych do łączenia metali ze względu na ich wytrzymałość i elastyczność, a także odporność na środki chemiczne i temperaturę. Właściwości te sprawiają, że są one idealnym wyborem do wielu zastosowań przemysłowych [4].

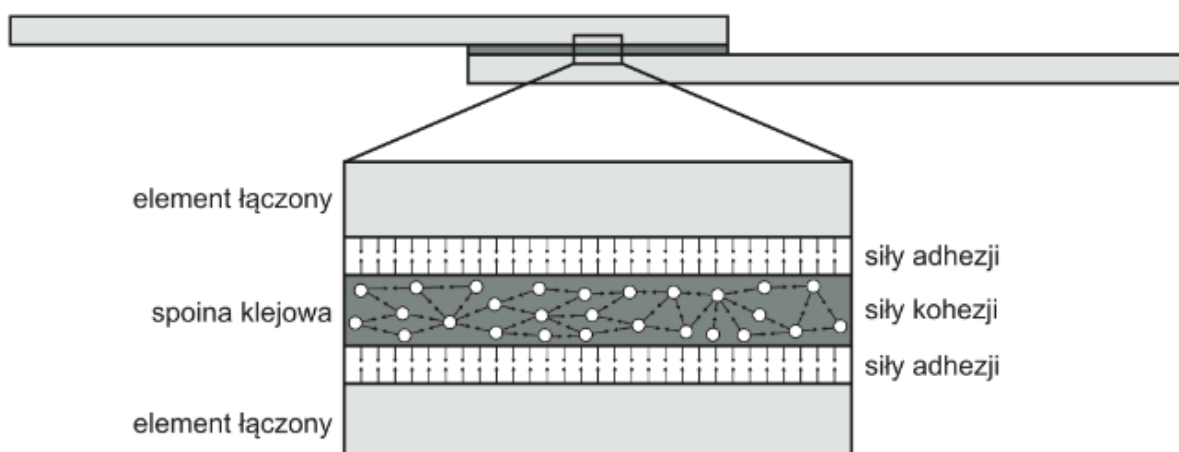
# 1. Determinanty wytrzymałości konstrukcyjnych połączeń klejowych

Procesy łączenia klejowego obejmują wiele zjawisk, które są kluczowe dla stworzenia skutecznego i trwałego połączenia. Pierwszym z nich jest przygotowanie powierzchni, które może obejmować czyszczenie, obróbkę mechaniczną, chemiczną lub termiczną. Celem jest uzyskanie czystej, chropowatej powierzchni, która zwiększa przyczepność kleju [6]. Zanieczyszczenia na powierzchni mogą negatywnie wpłynąć na jakość połączenia, a odpowiednio chropowata powierzchnia zapewnia większy obszar kontaktu dla kleju [10].

Następnie klej jest aplikowany na przygotowane powierzchnie, które są łączone. Czas i warunki utwardzania kleju są kluczowe dla zapewnienia skutecznego połączenia. Kleje mogą utwardzać się w wyniku procesów chemicznych, jak w przypadku klejów dwuskładnikowych lub mogą wymagać dodatkowych czynników, takich jak ciepło czy światło UV.

## 1.1 Opis zjawisk występujących w procesach klejenia

Dwa kluczowe zjawiska, które następują podczas klejenia i determinują nośność połączeń klejowych, to adhezja (przyleganie kleju do powierzchni materiału) i kohezja (przyleganie cząsteczek kleju do siebie) [22]. W sposób schematyczny rozkład sił decydujących o nośności połączenia przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1. 1. Siły adhezji i kohezji w złączeniu klejowym [21]

W przypadku adhezji, interakcje między cząsteczkami kleju a powierzchnią materiału powodują przyleganie kleju [1]. Adhezja to zdolność fizycznego przyciągania lub łączenia się

ze sobą dwóch substancji w wyniku oddziaływań międzycząsteczkowych. Można wyróżnić adhezję mechaniczną, wynikającą z zazębienia się kleju i powierzchniowych warstw elementów oraz adhezję właściwą, związana z działaniem sił występujących na styku łączonych ciał, siły dyspersyjne, elektrostatyczne i indukcyjne [12,21]. Chropowatość, czystość i właściwości energetyczne powierzchni mają wpływ na adhezję kleju do powierzchni [22].

Kohezja wynika z interakcji między samymi cząstkami kleju, które przyciągają się nawzajem, tworząc trwałą strukturę [5]. Kohezja, inaczej spoistość, jest to zjawisko stawiania oporu przez ciała fizyczne, poddawane rozdzielaniu na części. Jej miarą jest praca potrzebna do rozdzielenia określonego ciała na części, podzielona przez powierzchnię powstałą na skutek tego rozdzielania przez siły działające wewnątrz rozrywanego ciała [6].

Należy także wskazać, że klej w połączeniu klejowym pełni rolę elementu przenoszącego naprężenia pomiędzy łączonymi elementami. Klej musi być zdolny do przenoszenia różnych rodzajów naprężeń, takich jak naprężenia ściskające, rozciągające i ścinające. Właściwości mechaniczne kleju, takie jak wytrzymałość, moduł sprężystości i wydłużenie przy zerwaniu, są kluczowe dla efektywnego przenoszenia tych naprężeń [12]. Poza tym, kluczowe są właściwości mechaniczne, chemiczne i termiczne użytych (klejonych) materiałów, jak również ich zgodność z klejem, mają znaczący wpływ na wytrzymałość połączenia klejowego [13].

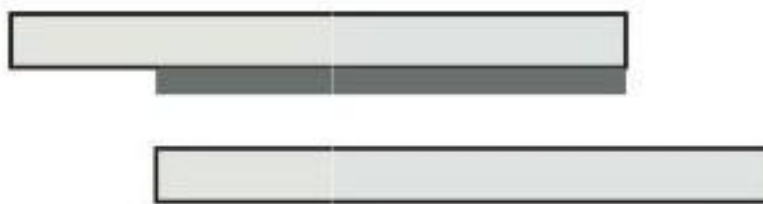
W miejscu połączenia, naprężenia ściskające mogą powodować odkształcenia lub uszkodzenia. Właściwe zaprojektowanie połączenia, takie jak zastosowanie zakładki, może pomóc rozłożyć te naprężenia i zwiększyć wytrzymałość połączenia [10]. Zakładki mogą znacznie wpływać na wytrzymałość połączenia klejowego, rozkładając naprężenia i zwiększając efektywną powierzchnię klejenia. Geometria zakładki, tak jak nacięcia i otwory, ma znaczący wpływ na redukcję i bardziej równomierny rozkład naprężeń [2].

Istotne są ponadto warunki, w których jest stosowany klej, takie jak temperatura, wilgotność, czas utwardzania, mogą one wpływać na jakość połączenia klejowego.

Każde z powyższych zjawisk ma kluczowe znaczenie dla procesu klejenia i może wpływać na wytrzymałość i trwałość połączenia klejowego. Dlatego ważne jest odpowiednie ich uwzględnienie w procesie projektowania i wykonywania połączeń klejowych. Typ połączenia (na przykład, czy jest to połączenie czołowe, kątowe, czy z zastosowaniem zakładki), rodzaj obciążenia (ściągające, ściskające, skręcające), a także sposób rozmieszczenia obciążenia, mogą wpływać na wytrzymałość połączenia klejowego [1].

W zależności od tego które siły w złączeniu klejowym są przekroczone w wyniku działania obciążenia, można mówić o różnych mechanizmach zniszczenia tego połączenia. Zniszczenia jakie mogą zachodzić w połączeniu klejowym to: adhezyjne, kohezyjne oraz adhezyjno-kohezyjne, czyli mieszane (połączenia zniszczenia adhezyjnego z kohezyjnym). Podczas badań eksperymentalnych rodzaj zniszczenia próbek jaki zachodzi determinuje możliwość określenia danego rodzaju wytrzymałości. Jeśli badana próbka uległa zniszczeniu wskutek mechanizmu adhezyjnego, to możliwe jest wyznaczenie wytrzymałości adhezyjnej. Analogicznie, jeśli stwierdzono zniszczenie próbki wskutek mechanizmu kohezyjnego, to wtedy można określić wartość wytrzymałości kohezyjnej [35].

Zniszczenie adhezyjne polega na utracie przyczepności skleiny do łączonych elementów. Zniszczenie adhezyjne zachodzi w przypadku, gdy naprężenia wywołane obciążeniem zewnętrznym przekraczają graniczne naprężenia przyczepności spoiny klejowej w stosunku do łączonych elementów. W wyniku mechanizmu adhezyjnego zniszczona skleina charakteryzuje się całkowitym odłączeniem od części sklejanych (rys. 1.2). Odłączenie od elementów sklejanych niekoniecznie musi zachodzić w pełni od jednego z nich.

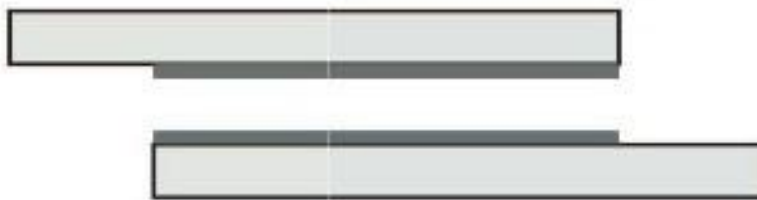


Rys. 1. 2. Mechanizm zniszczenia adhezyjnego połączeń klejowych [21]

Przyczyn tego rodzaju zniszczenia można doszukiwać się w nieprawidłowo przygotowanej powierzchni klejonych elementów, gdzie nastąpiło przerwanie spoiny od sklejanego materiału. Zdarza się także to zjawisko wśród złączy prawidłowo przygotowanych, zwykle ze względu na wysoką wytrzymałość materiału tworzącego klej w stosunku do wytrzymałości adhezyjnej połączenia klejowego.

Natomiast, zniszczenie złączy w wyniku mechanizmu kohezyjnego wynika z utraty nośności materiału tworzącego klej. Ma ono ścisły związek z wytrzymałością samej spoiny klejowej. Zniszczenie kohezyjne występuje, gdy stan naprężeń wywołany obciążeniem zewnętrznym prowadzi do zniszczenia skleiny samej w sobie. Występowanie tego mechanizmu

zniszczeń jest pożądanym efektem, ponieważ pozwala na lepsze wykorzystanie własności substancji klejowej. Złącze zniszczone kohezyjnie charakteryzuje się rozwarstwieniem spoiny. Części kleju pozostają na powierzchniach obu łączonych elementów (rys. 1.3).



Rys. 1. 3. Mechanizm zniszczenia kohezyjnego połączeń klejowych [21]

Zastosowanie kleju odpowiedniej wytrzymałości oraz prawidłowe przygotowanie powierzchni styku łączonych elementów prowadzi do tego rodzaju zniszczenia. Dodatkowo, gdy warstwa kleju posiada znaczną grubość wtedy również występuje zniszczenie kohezyjne.

## 1.2 Czynniki mające wpływ na wytrzymałość statyczną połączeń klejowych

Analiza literatury oraz własne doświadczenia pozwalają stwierdzić, że na właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych ma wpływ wiele czynników konstrukcyjnych. Do najistotniejszych z nich należą: długość zakładki ( $l$ ) [14-15], grubość klejonych elementów ( $\delta$ ), grubość spoiny klejowej ( $\delta_k$ ) [16-20], wielkość wypływki, ukosowanie końców zakładki, sztywność kleju w stanie utwardzonym ( $G_k$ ), sztywność materiałów łączonych ( $E_m$ ), rodzaj zastosowanej konstrukcji klejowej [23], metodyka przygotowania powierzchni adherentów przed połączeniem [22].

Dla problemu naukowego rozważanego w niniejszej pracy, jakim są zakładkowe połączenia klejowe, znaczącym czynnikiem mającym wpływ na wytrzymałość połączenia klejowego ma długość zakładki [14-15]. W opracowaniu Borosa i inni, przeanalizowano rozkład naprężeń dla różnych geometrii połączeń. Z przeprowadzonych doświadczeń wywnioskowano, że optymalny typ złącza w znacznym stopniu zależy od rodzaju użytego kleju. Stwierdzono, iż kleje o słabszym wiązaniu i plastyczne są bardziej odpowiednie dla geometrii złącza, które wykazują duże zmiany naprężeń. Długość zakładki powyżej danej wartości nie skutkuje wzrostem wytrzymałości [24-25].

W opracowaniach poświęconych połączeniom klejowym zakładkowym jako jeden z czynników konstrukcyjnych uwzględnianych przy ich projektowaniu jest długość zakładki połączenia [25,26]. W takich połączeniach istnieje tak zwana „graniczna długość zakładki”. Przekroczenie granicznej długości zakładki zgodnie z teorią Volkersena nie powinno powodować dalszego zwiększenia wytrzymałości połączenia klejowego. Znajomość granicznej grubości zakładki pozwala na pośrednie obliczenie grubości łączonych elementów. W przypadku klejenia jednakowych elementów graniczną długość zakładki można określić zależnością (1.1.):

$$l_{gr} \geq 5 \sqrt{\frac{Eg g_k}{2G_k}} \quad (1.1)$$

gdzie:

E – współczynnik sprężystości wzdłużnej elementów klejowych,

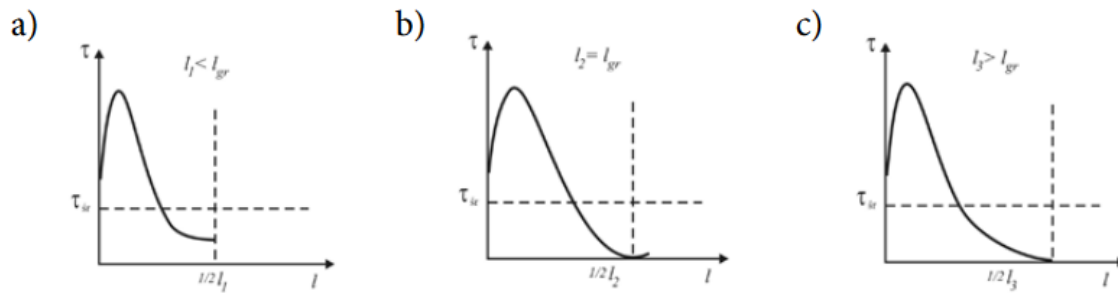
g – grubość elementów klejonych,

$g_k$  – grubość spoiny klejowej,

$G_k$  – współczynnik sprężystości postaciowej kleju w stanie utwardzonym.

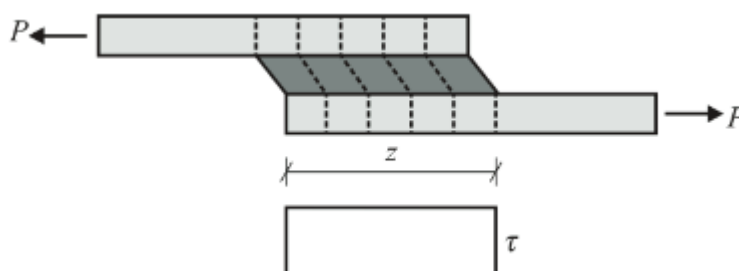
### **1.2.1 Rozkład naprężeń w obciążonych połączeniach klejowych o różnej geometrii**

Połączenie klejowe, w których długość zakładki jest mniejsza od granicznej długości zakładki, której przekroczenie nie powoduje dalej zwiększenia wytrzymałości połączenia, spoina klejowa jest obciążona na całej długości. Przyrost nieliniowego wzrostu jest widoczny od środka zakładki do jej krańców jako naprężenie statyczne. W przypadku odwrotnym, gdy to długość zakładki jest większa od długości granicznej, naprężenie styczne na środkowej części zakładki ma wartość zbliżoną do zera (rys. 1.4). Zachodzi tutaj zależność pomiędzy graniczną długością zakładki spoiny klejowej  $l_{gr}$ , a rozkładem naprężenia wzdłuż długości zakładki i współczynnikiem spiętrzenia naprężenia [28].



Rys. 1. 4. Rozkład naprężenia stycznego  $\tau$  w spoinie klejowej połączeń obciążonych na ściąganie w zależności od długości zakładki  $l$ : a) długość zakładki mniejsza niż graniczna; b) długość zakładki równa długości granicznej; c) długość zakładki większa niż graniczna; gdzie:  $\tau$  – naprężenie styczne,  $\tau_{sr}$  – średnie naprężenie styczne;  $l_1, l_2, l_3$  – długość zakładki,  $l_{gr}$  – graniczna długość zakładki [25]

Do wyznaczenie rozkładu naprężeń stycznych na długość spoiny wykorzystano modele analityczne: uproszczone podejście liniowo-sprężyste oraz wspomnianą już wcześniej teorię Volkersena. Model uproszczony zakłada nie odkształcalność elementów klejonych, uznając je sztywnymi częściami obciążonymi osiowo [30]. Z kolei spoina klejowa potraktowana jest jako ciało doznające jedynie odkształceń stałych na długości zakładki (rys. 1.5).



Rys. 1. 5. Deformacja w złączu jednozakładowym ze sztywnymi elementami łączonymi [30]

Konkluzją powyższego jest równomierny rozkład naprężeń stycznych na długości zakładki. Ze wzoru (1.2) można wyznaczyć wartość tych naprężeń. Naprężenia normalne w elementach poza zakładką są stałe, a ich wartości wyznacza się ze wzoru (1.3). Wartość naprężenia normalnego na długości zakładki spada liniowo do zera.

$$\tau = \frac{P}{b_z z} \quad (1.2)$$

gdzie:

$\tau$  – naprężenia ścinające w spoinie klejowej,

$P$  – siła rozciągająca próbkę,

$b_z$  – szerokość zakładki,

$z$  – długość zakładki.

$$\sigma = \frac{P}{A_p} \quad (1.3)$$

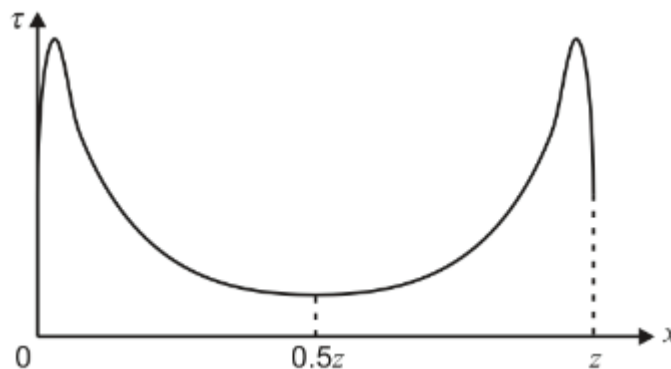
gdzie:

$\sigma$  – naprężenia normlane w próbce,

$A_p$  – pole przekroju poprzecznego płaskownika.

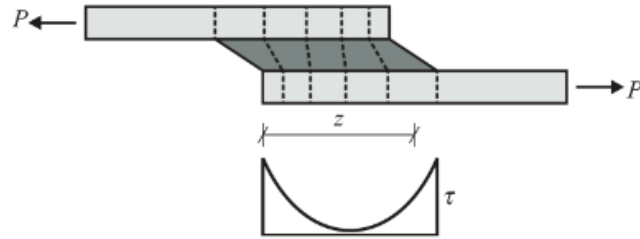
Przedstawione wzory obliczeniowe wynikają z podstawowych zależności wytrzymałościowych. W praktyce wykorzystywane są do wyznaczania nośności połączeń obciążonych na ścinanie w ujęciu normowym [31,32].

Model uproszczony ze sztywnymi elementami klejonymi umożliwia jedynie wstępną analizę oceny nośności złącza. Przede wszystkim należy zaznaczyć, iż w rzeczywistości rozkład naprężeń w połączeniu klejowym nie jest jednorodny, o czym świadczą opracowania Rudawskiej [33] oraz Piekarczyka [34]. Na rysunku 1.6 przedstawiono typowy przypadek naprężeń stycznych zmieniających się wzdłuż długości zakładki.



Rys. 1. 6. Rozkład naprężeń stycznych w spoinie klejowej na długości zakładki [33]

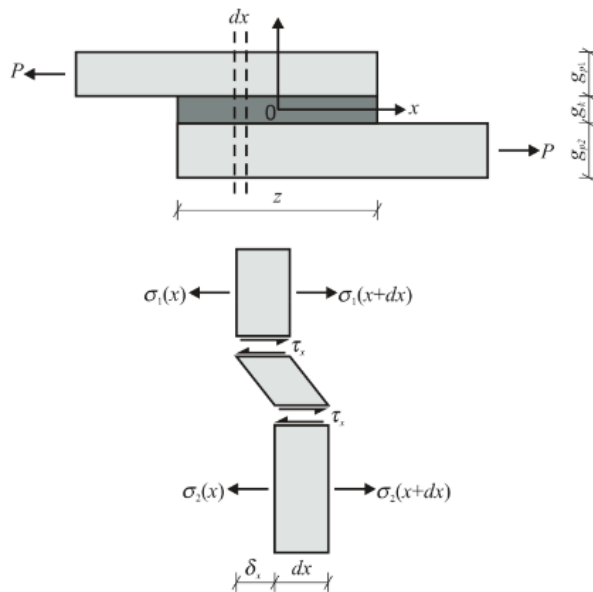
Potrzeba przeprowadzania bardziej złożonych analiz wpłynęła na konieczność powstawania bardziej skomplikowanych, a przede wszystkim dokładniejszych badań tego zagadnienia. Wspomniana wcześniej teoria Volkersena jest rozszerzeniem modelu uproszczonego, Volkersen zaproponował swój model rozwiązania w 1938 roku. Podobnie jak w poprzednio omawianym przypadku mamy obciążenia osiowe, jednak elementy klejone nie są już sztywne, lecz sprężyste, posiadają więc sztywność o pewnej ustalonej skończonej wartości. Prowadzi to do zróżnicowania odkształceń płaskownika na długości zakładki (rys. 1.7). Są to jedyne odkształcenia jakie powstają na elementach połączenia klejowego.



Rys. 1. 7. Deformacje w jednozakładowym złączu klejowym ze sprężystymi elementami łączonymi [30]

Przy założeniu idealnego przylegania kleju do blachy, niejednorodny rozkład odkształceń podłużnych elementów łączonych przekłada się na zróżnicowanie odkształceń postaciowych kleju. Jest to wówczas bliższe rzeczywistemu odwzorowaniu rozkładowi naprężeń. Z wykresu rozkładu wyraźnie widać, że wartości maksymalne występują przy krawędziach zakładki, a minimalna wartość występuje w środku złącza.

Elementy klejone są poddawane działaniu naprężeń normalnych, a klej działaniu naprężeń stycznych. Naprężenia panujące w przekrojach po obu stronach nieskończenie małego wycinka złącza o szerokości  $dx$  przedstawiono na rysunku 1.8.



Rys. 1. 8. Naprężenia w przekroju złącza według teorii Volkersena [30]

Przemieszczenie względne obu łączonych elementów dla nieskończenie małego wycinka elementu można wyznaczyć według poniższego wzoru:

$$\delta_x = \delta_0 - \int_{-0.5z}^x \varepsilon_1 dx + \int_{-0.5z}^x \varepsilon_2 dx \quad (1.4)$$

gdzie:

$\delta_x$  – przemieszczenie względne elementów klejonych w przekroju o współrzędnej  $x$ ,

$\delta_0$  – przemieszczenie względne elementów klejonych na początku zakładki,

$x$  – współrzędna określająca położenie przekroju złącza,

$z$  – długość zakładki,

$\varepsilon_1$  – odkształcenie podłużne górnego elementu klejonego,

$\varepsilon_2$  – odkształcenie podłużne dolnego elementu klejonego.

Obliczenia przeprowadzono dla jednostkowej szerokości zakładki, czyli  $b_z = 1$  przy założeniu obciążenia  $P$  na górny element łączony. Wówczas ze wzorów (1.5) oraz (1.6) można wyznaczyć odkształcenie podłużne elementów klejonych.

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E g_{p1}} \left[ P - \int_{-0.5z}^x \tau_x dx \right] \quad (1.5)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E g_{p2}} \int_{-0.5z}^x \tau_x dx \quad (1.6)$$

gdzie:

$E$  – moduł sprężystości podłużnej (Younga) blachy,

$g_{p1}$  – grubość górnego elementu klejonego,

$g_{p2}$  – grubość dolnego elementu klejonego,

$\tau_x$  – naprężenia styczne w przekroju na jednostkę szerokości złącza.

Założono wspólne odkształcenia dla obu elementów klejonych, czyli założono idealne przyleganie kleju, przemieszczenie względne łączonych elementów można wyznaczyć również w zależności od własności skleiny, według wzoru (1.7).

$$\delta_x = \frac{g_k}{G} \tau_x \quad (1.7)$$

gdzie:

$G$  – moduł ścinania (Kirchhoffa) materiału kleju,

$g_k$  – grubość spoiny klejowej.

Poprzez odpowiednie zabiegi przekształcające powyższe wzory (1.4), (1.5 i 1.6) po podstawieniu do wzoru (1.7) otrzymuje się następującą postać równania (1.8):

$$\tau_x'' = \omega^2 \tau_x \quad (1.8)$$

W powyższym równaniu (1.8) wprowadzono wielkość  $\omega^2$  aby przejrzyscie zaprezentować równanie, gdzie wskazana wielkość ma postać (1.9):

$$\omega^2 = \frac{G(g_{p1} + g_{p2})z^2}{E g_{p1} g_{p2} g_k} \quad (1.9)$$

W końcowej wersji rozwiązanie równania (1.8) daje następującą postać (1.10):

$$\tau_x = A_1 \cosh \omega x + A_2 \sinh \omega x \quad (1.10)$$

W powyższym rozwiązaniu wielkości stałe  $A_1$  oraz  $A_2$  zależą od warunków brzegowych.

Dla dalszych obliczeń przyjęto je jako bezwymiarowe wielkości, co daje kolejno (1.11):

$$\tilde{\tau} = \frac{\tau_x}{\tau_m} \quad (1.11)$$

gdzie:

$\tilde{\tau}$  – bezwymiarowy mnożnik średniej wartości naprężeń stycznych,

$\tau_m$  – wartość średnia naprężeń stycznych na jednostkę szerokości złącza.

Średnią wartość naprężeń stycznych na jednostkę szerokości złącza określa się następująco wzorem (1.12):

$$\tau_m = \frac{P}{z} \quad (1.12)$$

Po uwzględnieniu warunków brzegowych podstawionych do wzoru (1.11) otrzymujemy następująca postać (1.13):

$$\tilde{\tau} = \frac{\omega \cosh \omega \tilde{x}}{2 \sinh \frac{\omega}{2}} + \frac{(\psi-1)}{(\psi+1)} \frac{\omega \sinh \omega \tilde{x}}{2 \cosh \frac{\omega}{2}} \quad (1.13)$$

Bezwymiarowe współczynniki mają postać:

$$\omega^2 = (1 + \psi)\emptyset \quad \psi = \frac{g_{p1}}{g_{p2}} \quad \emptyset = \frac{Gz^2}{Eg_{p1}g_k} \quad \tilde{x} = \frac{x}{z}$$

W przypadku, gdy oba łączone elementy mają tą samą grubość,  $g_{p1} = g_{p2} = g_p$ , wówczas wzór (1.13) uprasza się do postaci (1.14):

$$\tilde{\tau} = \sqrt{\frac{\emptyset}{2}} \frac{\cosh \tilde{x} \sqrt{2\emptyset}}{\sinh \sqrt{\frac{\emptyset}{2}}} \quad (1.14)$$

Wtedy, wartość ekstremalna mnożnika naprężeń średnich wynosi według wzoru (1.15):

$$\tilde{\tau}_{max} = \sqrt{\frac{\emptyset}{2}} \coth \sqrt{\frac{\emptyset}{2}} \quad (1.15)$$

Dla długich złączy, gdzie  $z$  przyjmuje znaczne wartości, wzór (1.15) ma postać:

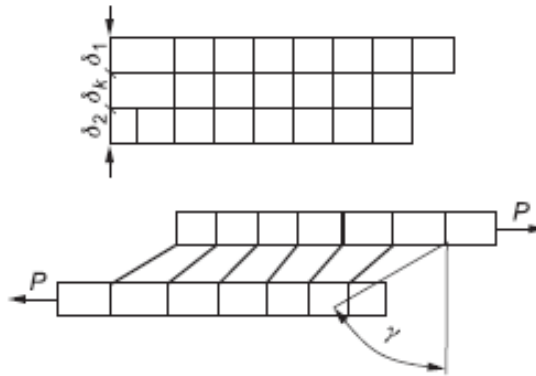
$$\tilde{\tau}_{max} = \sqrt{\frac{\emptyset}{2}} = \sqrt{\frac{Gz^2}{2Eg_p g_k}} \quad (1.16)$$

Wartość maksymalnych naprężeń stycznych można wyznaczyć na podstawie wzorów (1.10), (1.11) i (1.16):

$$\tau_{x,max} = P \sqrt{\frac{G}{2Eg_p g_k}} \quad (1.17)$$

Wobec powyższej analizy i przeprowadzonych wyliczeń można stwierdzić, że wartość naprężeń maksymalnych nie zależy od długości złącza [30].

Powyżej przedstawione rozważania dotyczyły wspólnego odkształcenia dla obu elementów klejonych, czyli założono idealne przyleganie kleju. Nierównomierne odkształcenia obu elementów klejonych oraz ich przesunięcie względem siebie powodują powstawanie w spoinie odkształceń postaciowych. Prowadzi to do powstawania naprężeń stycznych, których miarą jest wartość kąta odkształcenia postaciowego  $\gamma$  (rys. 1.9).



Rys. 1. 9. Model odkształcenia zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie,  $P$  – siła,  $\gamma$  – kąt odkształcenia spoiny klejowej,  $\delta_1, \delta_2$  – grubość klejonych elementów,  $\delta_k$  – grubość spoiny klejowej [44]

Naprężenia styczne w spoinie są funkcją kąta odkształcenia postaciowego kleju i modułu sprężystości postaciowej kleju  $G_k$ , według wzoru (1.18):

$$\tau = G_k \gamma \quad (1.18)$$

Ze względu na przyjęty model kleju jako ciała liniowo –sprężystego wartość  $G_k$  jest stała, a więc (1.19):

$$d\tau = G_k d\gamma \quad (1.19)$$

gdzie:

$\tau$  – naprężenia styczne w spoinie,

$G_k$  – moduł sprężystości postaciowej kleju,

$\gamma$  – kąt odkształcenia spoiny klejowej.

Badając z połączenia klejowego elementarny wycinek  $dx$ , można stwierdzić, że elementy klejone są obciążone naprężeniami normalnymi  $\sigma_1(x)$  i  $\sigma_2(x)$  (rys. 1.10). Zmianę kąta odkształcenia spoiny na elementarnym wycinku  $dx$  można określić za pomocą wzoru (1.20):

$$d\gamma = \frac{\varepsilon dx_1}{\delta_k} - \frac{\varepsilon dx_2}{\delta_k} \quad (1.20)$$

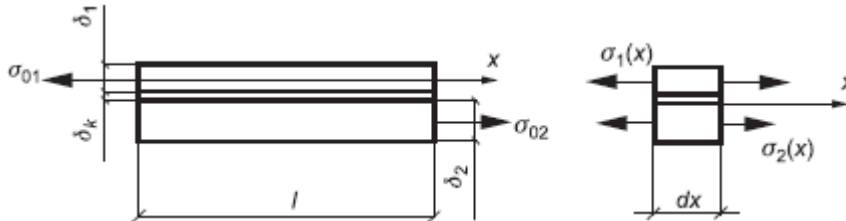
gdzie:

$d\gamma$  – kat odkształcenia spoiny,

$\varepsilon dx_1$  – odkształcenie elementarnego wycinka pierwszego elementu klejonego,

$\varepsilon dx_2$  – odkształcenie elementarnego wycinka drugiego elementu klejonego,

$\delta_k$  – grubość spoiny klejowej.



Rys. 1. 10. Obciążenie elementarnego wycinka zakładkowego połączenia klejowego o długości 1,  $\sigma_{01}, \sigma_{02}$  – naprężenia normalne występujące w elemencie klejonym poza spoiną,  $\delta_1, \delta_2$  – grubości klejonych elementów,  $\delta_k$  – grubość spoiny,  $\sigma(x)$  – naprężenia normalne w elemencie klejonym w przekroju x [43]

Przy sprężystych odkształceniach elementów połączenia klejowego opierając się na prawie Hooke’a wynikają następujące zależności (1.21):

$$\frac{\varepsilon dx_1}{dx} = \frac{\sigma_1(x)}{E_1}, \frac{\varepsilon dx_2}{dx} = \frac{\sigma_2(x)}{E_2} \quad (1.21)$$

gdzie:

$\varepsilon dx_1$  – odkształcenie elementarnego wycinka pierwszego elementu klejonego,

$\varepsilon dx_2$  – odkształcenie elementarnego wycinka drugiego elementu klejonego,

$E_1$  – moduł sprężystości wzdłużnej pierwszego elementu klejonego,

$E_2$  – moduł sprężystości wzdłużnej drugiego elementu sprężystego,

$dx$  – elementarny wycinek z połączenia klejowego

$\sigma_1(x)$  – naprężenia normalne pierwszego elementu klejonego,

$\sigma_2(x)$  – naprężenia normalne drugiego elementu klejonego.

Podstawiając zależności (1.21) do wzoru (1.20) oraz ich wynik do równania (1.19), daje następującą postać (1.22):

$$d\tau = \frac{\sigma_1(x)}{E_1} \frac{dx}{\delta_k} G_k - \frac{\sigma_2(x)}{E_2} \frac{dx}{\delta_k} G_k \quad (1.22)$$

Warunek równowagi sił działających na elementarny wycinek elementu klejonego ma postać (1.23), co daje z obliczeń różniczkowych następujący wzór (1.24):

$$d\sigma_1(x)\delta_1 = \tau(x) dx \quad (1.23)$$

$$d\tau(x) = \delta_1 \frac{d^2\sigma_1(x)}{dx^2} dx \quad (1.24)$$

Podstawienie powyższej zależności różniczkowej (1.24) do równania (1.22) pozwala uzyskać postać różniczkową zmiany naprężeń normalnych w elementach klejonych na odcinku spoiny (1.25):

$$\frac{d^2\sigma_1(x)}{dx^2} = \frac{G_k}{\delta_k\delta_1} \left( \frac{\sigma_1(x)}{E_1} - \frac{\sigma_2(x)}{E_2} \right) \quad (1.25)$$

Z warunku równowagi sił działających na fragment rozpatrywanego połączenia klejowego co przedstawiono na rysunku 1.11, można wskazać zależność między naprężnikami  $\sigma_1(x)$  oraz  $\sigma_2(x)$  (1.26).

$$\sigma_2(x) = (\sigma_{01} - \sigma_1(x)) \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad (1.26)$$

Zatem poprzednie rozważanie wzoru (1.25) można zapisać w postaci (1.27):

$$\frac{d^2\sigma_1(x)}{dx^2} = \frac{G_k}{\delta_k\delta_1} \left( \frac{\sigma_1(x)}{E_1} - \frac{\sigma_{01}\delta_1}{E_2\delta_2} + \frac{\sigma_1(x)}{E_2\delta_2} \right) \quad (1.27)$$

Rozwiązaniem tego równania (1.27) dla wyliczenia naprężenia normalnego w elemencie klejonym w przekroju x będzie (1.28):

$$\sigma_1(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} + \sigma_{01} \frac{\delta_1 E_1}{\delta_1 E_1 + \delta_2 E_2} \quad (1.28)$$

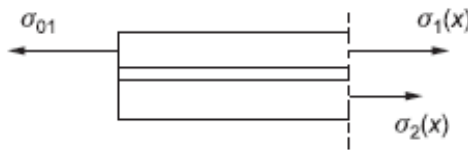
gdzie:

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego,

$$m = \sqrt{\frac{G_k}{\delta_k} \frac{\delta_1 E_1 + \delta_2 E_2}{\delta_1 E_1 \delta_2 E_2}},$$

$C_1, C_2$  – stałe całkowania, które można wyznaczyć z warunków brzegowych dla  $x = 0$ ,

$\sigma_1(x) = \sigma_{01}$  oraz  $x = 1, \sigma_1(x) = 0$ .



Rys. 1. 11. Obciążenie fragmentu zakładkowego połączenia klejowego  $\sigma_0$  – naprężenia występujące w elemencie klejonym poza spoiną,  $\sigma(x)$  – naprężenia występujące w elementach klejonych na odcinku spoiny w przekroju x [43]

Rozkład naprężeń normalnych  $\sigma_1(x)$  w elementach klejonych opisuje poniższy wzór (1.29):

$$\sigma_1(x) = \frac{\sigma_{01}}{1+S} \left\{ \frac{(S+e^{ml})e^{-mx} - (S+e^{-ml})e^{mx}}{e^{ml} - e^{-ml}} + S \right\} \quad (1.29)$$

w którym:

$$S = \frac{\delta_1 E_1}{\delta_2 E_2} \quad (1.30)$$

Zależność opisująca rozkład naprężeń normalnych w jednym z dwóch elementów klejonych pozwala wyznaczyć rozkład naprężeń stycznych w spoinie klejowej poprzez wykorzystanie zależności opisanej poniższym wzorem (1.31):

$$\tau(x) = \frac{d\sigma_1(x)}{dx} \delta_1 = \frac{d\sigma_2(x)}{dx} \delta_2 \quad (1.31)$$

Rozkład naprężeń stycznych w spoinie zakładkowego połączenia klejowego opisuje wzór (1.32):

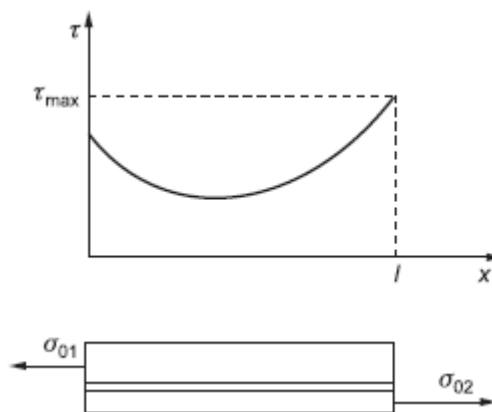
$$\tau(x) = \frac{\sigma_{01} \delta_1 m}{(1+S) \sinh ml} [S \cosh ml + \cosh m(l-x)] \quad (1.32)$$

gdzie:

$\sinh$  – sinus hiperboliczny,

$\cosh$  – cosinus hiperboliczny.

Z powyższego wzoru (1.32) wynika, że w spoinach zakładkowych połączeń klejowych obciążonych na ścinanie występuje nierównomierny rozkład naprężeń stycznych. Charakteryzuje on występowanie maksymalnych naprężeń na brzegach spoiny, obrazuje to rysunek 1.12.



Rys. 1. 12. Rozkład naprężeń stycznych wzdłuż spoiny zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie, dwa elementy o różnej grubości, sztywności [44]

Jeżeli zakładkowe połączenie klejowe jest wykonane z dwóch elementów, które charakteryzuje jednakowa sztywność na rozciąganie, występuje zależność:

$$\delta_1 E_1 = \delta_2 E_2 \text{ więc } S=1 \quad (1.33)$$

Wówczas rozkład naprężeń w spoinie jest symetryczny i opisuje do następujący wzór (1.34).

$$\tau(x) = \frac{\sigma_{01}\delta_1 m}{2 \sinh ml} [\cosh mx + \cosh m(l-x)] \quad (1.34)$$

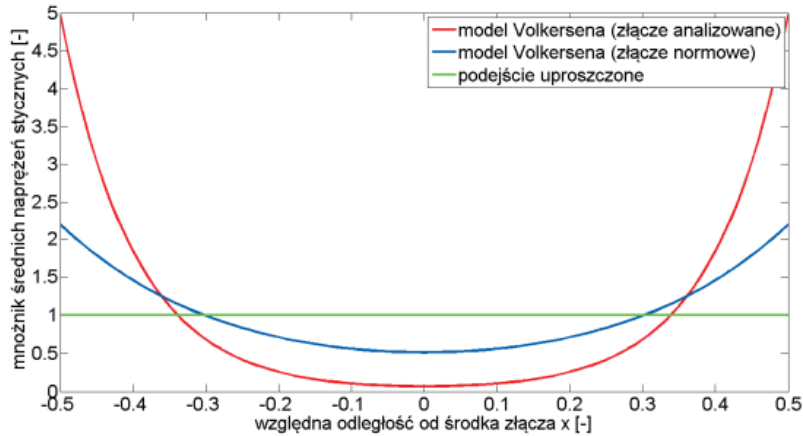
Spoina klejowa ulegnie zniszczeniu, gdy naprężenia maksymalne w spoinie przekroczą wartość naprężeń niszczących. Znając wartość naprężeń niszczących spoiny, można określić wytrzymałość połączenia klejowego. Wytrzymałość zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie opisuje siła niszcząca połączenie (1.35) wyprowadzona ze wzoru (1.21). Biorąc pod uwagę, że  $P = \sigma_{01} b \delta$ , wtedy:

$$P = \tau_n b \sqrt{\frac{2\delta_k \delta E}{G_k} \frac{\sinh ml}{\cosh ml + 1}} \quad (1.35)$$

Wyprowadzone zależności nie do końca nadają się do wykorzystania dla obliczeń wytrzymałościowych z powodu przyjętych uproszczeń obarczone są dużym błędem. Jednak w praktyce mogą posłużyć do oceny wpływu różnych czynników na wytrzymałość zakładkowego połączenia klejowego. Zakładkowe połączenie klejowe obciążone na ścinanie zależy nie tylko od właściwości mechanicznych kleju o czym świadczą wartości naprężeń niszczących i moduł sprężystości postaciowej, lecz także od wymiarów połączenia tj.: szerokość, długość i grubość spoiny klejowej a także od grubości klejonych elementów i ich modułu sprężystości wzdłużnej.

## 1.2.2 Uwarunkowania geometryczne wpływające na nośność połączeń klejowych

Rozkład naprężeń w modelu uproszczonym zaprezentowano na rysunku 1.13. Analiza wykresu pokazuje, iż wartość naprężeń stycznych przy krawędzi zakładki wyznaczona zgodnie z modelem Volkersena kilkukrotnie przewyższa średni poziom naprężeń uzyskany w modelu uproszczonym. Złącza o geometrii normowej mają ten efekt znacznie mniej zauważalny, około dwukrotny wzrost. Na tej podstawie można stwierdzić, że w przypadku krótszych zakładek rozkład naprężeń jest bardziej równomierny.

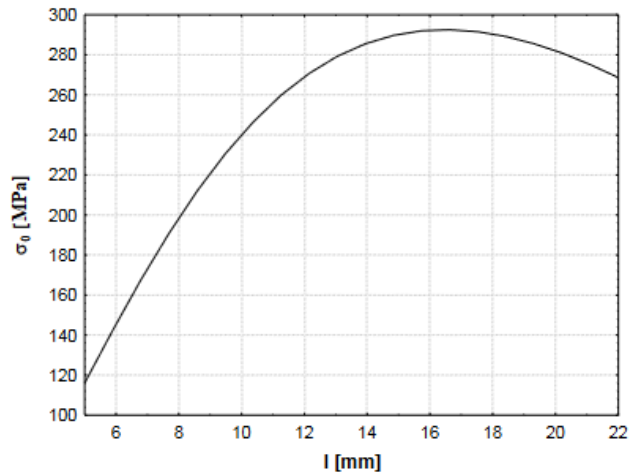


Rys. 1. 13. Porównanie rozkładów naprężeń stycznych na długości zakładki [85]

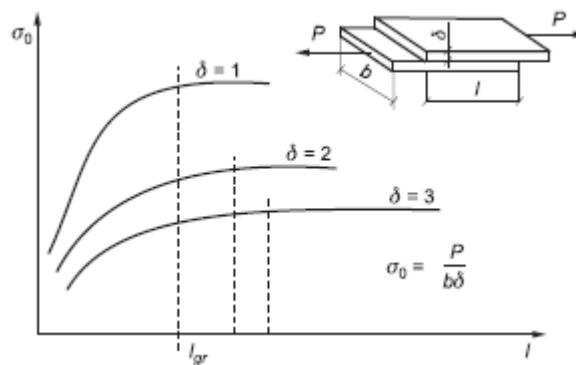
Analizując wpływ długości zakładki na wytrzymałość połączenia klejowego stwierdzono, że ich cechą charakterystyczną zakładkowych połączeń klejowych obciążonych na ścinanie jest fakt, iż ich wytrzymałość nie jest proporcjonalna do długości zakładki. Co za tym idzie nie jest proporcjonalna do pola powierzchni spoiny [29]. Na rysunku 1.13 przedstawiono przykładowy nomogram nośności zakładkowego połączenia klejowego.

Zwiększenie długości zakładki, innymi słowy, zwiększenie długości spoiny klejowej niekoniecznie prowadzi do zwiększenia wytrzymałości połączenia klejowego, jeśli zostanie przekroczona jej długość graniczna (rys. 1.14), czego potwierdzeniem jest przedstawiona poniżej analiza.

Klejąc grubsze, sztywniejsze elementy, uzyskuje się większą wytrzymałość połączeń, ale z kolei mniejsze maksymalne wyężenie łączonych materiałów pod obciążeniem niszczącym [35]. W następstwie tego, jeśli optymalizacja konstrukcji ma polegać na zrównaniu wytrzymałości łączonych elementów z wytrzymałością spoiny, zastosowanie klejenia konstrukcyjnego jest uzasadnione do łączenia jedynie cienkich elementów.

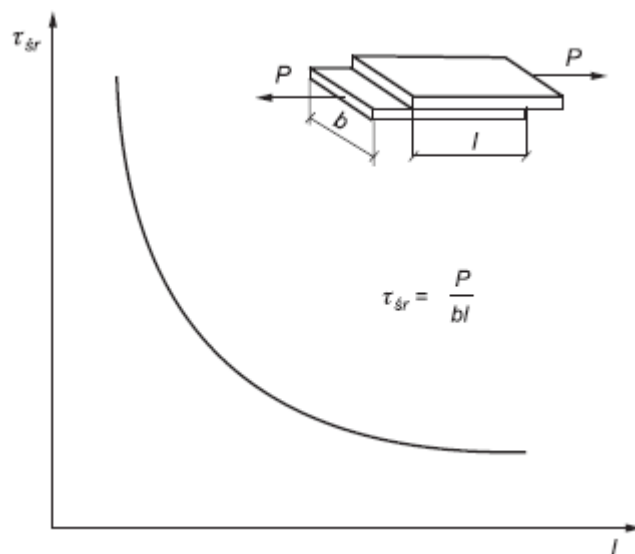


Rys. 1. 14. Nomogram nośności jedno zakładkowego połączenia blach stalowych o grubości  $\delta=1$  [mm], grubości spoiny klejowej  $\delta_k=0,1$ [mm], parametr  $R_q=1,7$ [ $\mu\text{m}$ ], klejonych klejem Epidian 57/PAC/100:80 [26]



Rys. 1. 15. Zależność wytrzymałości ( $P$ ) zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie od długości zakładki ( $l$ ) i grubości ( $\delta$ ) elementów klejonych [5]

W związku z tym, iż wytrzymałość klejonych elementów nie jest proporcjonalna do pola powierzchni spoiny, określenie wytrzymałości tychże połączeń za pomocą średnich naprężeń stycznych, stosunku siły niszczącej do pola powierzchni spoiny (rys. 1.15), jest nieprecyzyjne. Średnie naprężenia styczne  $R_t$  wykorzystywane są do porównania wytrzymałości na ścinanie klejów zgodnie z normą, w której określona jest długość zakładki oraz gatunek i grubość klejonych elementów.

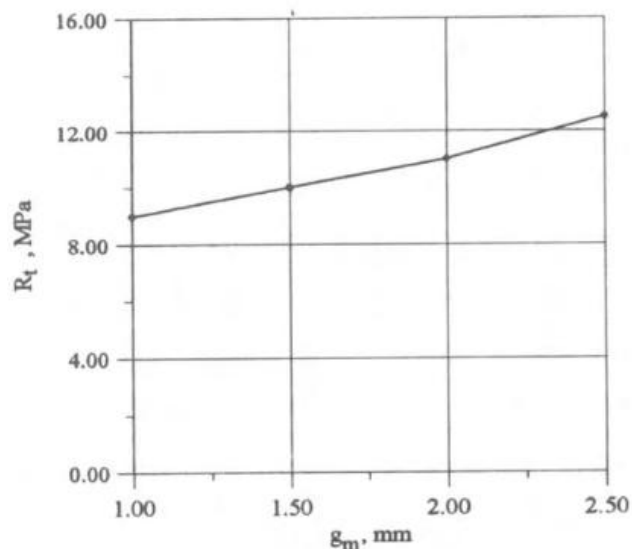


Rys. 1. 16. Zależność średnich naprężeń stycznych  $\tau_{sr}$  w spoinie zakładkowego połączenia klejowego obciążonego siłą  $P$  od długości zakładki  $l$  [44]

Określenie wytrzymałości zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie za pomocą naprężeń normalnych występujących w elementach klejonych w chwili niszczenia spoiny jest wiarygodniejsze. Naprężenia te pozwalają ocenić zakres wykorzystywania własności wytrzymałościowych elementów klejonych poprzez porównanie naprężeń z wytrzymałością klejonych materiałów. Świadczy o tym wspomniana już wcześniej tzw. graniczna długość zakładki spoiny klejowej  $l_{gr}$ , której przekroczenie nie powoduje już zwiększenia wytrzymałości dla tego połączenia.

### 1.2.3 Wpływ właściwości klejów na właściwości mechaniczne połączeń klejowych

Jak już wspomniano powyżej nie bez znaczenia pozostaje grubość klejonych elementów, która ma wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych. Wyniki prac badawczych wskazane w prezentowanych opracowaniach [29,36] wskazują, że wraz ze wzrostem grubości klejonych elementów wzrasta wytrzymałość połączenia klejowego. Ma to związek ze zmianą rozkładu naprężeń w spoinie klejowej. Przykładowy przebieg zmiany wytrzymałości połączenia klejowego w funkcji grubości łączonych elementów przedstawiono na rysunku 1.16.



Rys. 1. 17. Wpływ grubości łączonych elementów  $\delta$  ( $g_m$ ) na wytrzymałości na ścinanie  $R_t$ , klej E5/Z-1/10:1 [28]

Znaczącym czynnikiem mającym istotny wpływ na wytrzymałość zakładkowego połączenia klejowego jest grubość spoiny. W pracach [28-42] zaprezentowano wyniki badań dotyczące analizy grubości spoiny. Wraz ze wzrostem grubości klejonych elementów wzrasta wytrzymałość połączenia. Wynika to z rozkładu naprężeń w spoinie klejowej, występuje zjawisko koncentracji naprężeń występujące w pobliżu krawędzi czołowej połączenia [41-42]. Kuczmaszewski w swoim opracowaniu [38] wykazał, że wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych zakładkowych wzrasta wraz ze wzrostem grubości łączonych elementów niezależnie od sztywności stosowanego kleju. W niektórych pracach prezentowana jest zależność wytrzymałości od grubości łączonych materiałów i długości zakładki określona przez współczynnik de Bruyna i wyrażony wzorem (1.36) [38, 39, 40]:

$$I = \frac{\sqrt{g}}{l} \quad (1.36)$$

gdzie:

$g$  – grubość łączonych elementów,

$l$  – długość zakładki spoiny klejowej.

Z wielu przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że optymalna grubość warstwy kleju wynosi ok. 0,05 – 0,15 mm [36,47-48]. Zalecana przez producentów klejów grubość linii kleju o wartościach 0,05 – 0,15 mm daje najlepszą wytrzymałość na ścianie przy rozciąganiu. W przypadku zastosowania bardzo cienkiej warstwy kleju istnieje ryzyko

niepełnego wypełnienia powierzchni spoiną. Dzieje się tak z powodu kontaktu pomiędzy wysokimi punktami na powierzchniach klejonych elementów [32].

W literaturze można odszukać teoretyczne zależności określające wytrzymałość połączeń klejowych na ścinanie [10]. Dla połączenia zakładkowego obciążonego siłami rozciągającymi elementy połączenia klejowego, wytrzymałość połączenia ma następującą postać:

$$P = \tau_n b \sqrt{\frac{2E\delta\delta_k}{G_k}} \quad (1.37)$$

gdzie:

$\tau_n$  – niszczące naprężenie styczne spoiny klejowej,

$b$  – szerokość spoiny klejowej,

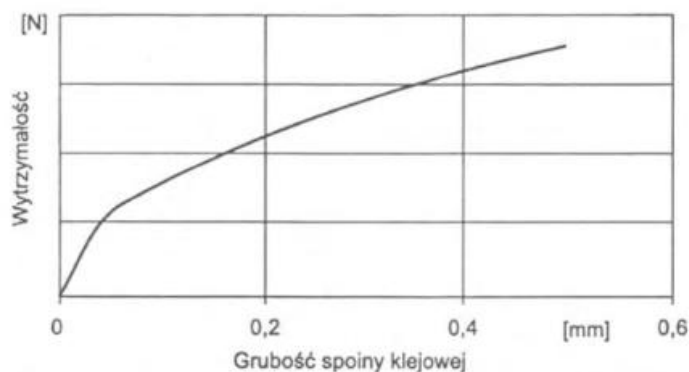
$E$  – moduł sprężystości wzdłużnej elementów klejonych,

$G_k$  – moduł sprężystości postaciowej spoiny klejowej,

$\delta$  – grubość elementu klejonego,  $\delta_k$  – grubość spoiny klejowej.

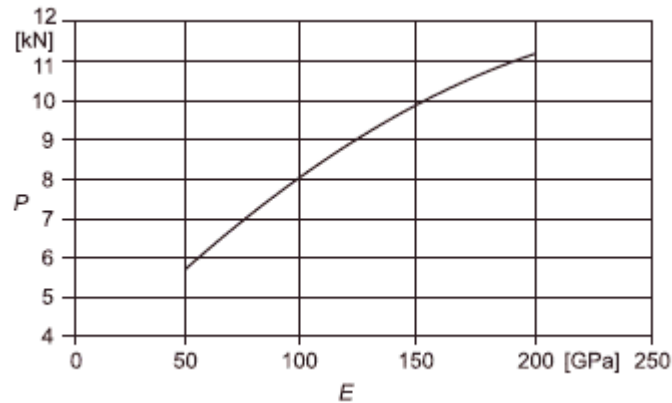
W powyższej zależności występuje parametr grubości spoiny klejowej. Zakładając, iż wartość naprężeń niszczących spoiny nie zależy od ich grubości, zależność wytrzymałości połączeń obciążonych na ścinanie byłaby w podanej postaci (1.38):

$$P = C\sqrt{\delta_k} \quad (1.38)$$



Rys. 1. 18. Charakter zależności wytrzymałości na ścinanie lub oddzieranie połączenia klejowego od grubości spoiny, przy założeniu niezależności naprężeń niszczących od jej grubości  $\tau_n \neq f(\delta_k)$  [48]

Łącząc ze sobą powyższe rozważania oraz mając na to potwierdzenie w wielu opracowaniach naukowych można potwierdzić przydatność zależności opisującej wytrzymałość zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie do określenia wpływu wymiarów złącza klejowego oraz właściwości klejonych elementów na wytrzymałość tego połączenia (rys. 1.18).



Rys. 1. 19. Zależność wytrzymałości  $P$  zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie od wartości modułu sprężystości  $E$  klejonych elementów

Należy także zaznaczyć, że zależność wytrzymałości połączenia od grubości spoiny jest inna, niż wynikałoby to ze wzoru (1.36), wynika z tego, że naprężenia niszczące klejów są zależne od grubości spoiny  $\tau_n = f(\delta_k)$ .

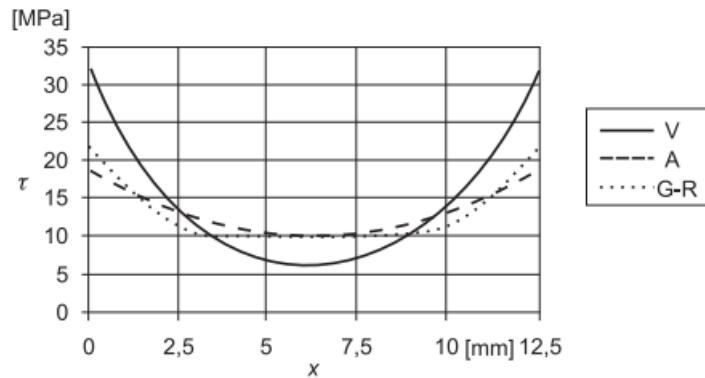
Rozkład naprężeń stycznych w spoinie klejowej zakładkowego połączenia klejowego przy uwzględnieniu poprzecznych odkształceń klejonych elementów został wyznaczony przez Adamsa [70]. Jeżeli zakładkowe połączenie klejowe charakteryzuje jednakowa sztywność na rozciąganie klejonych elementów, to rozkład naprężeń stycznych w spoinie opisuje następująca zależność (1.39):

$$\tau(x) = \frac{\sigma_0 \delta}{4l} \left\{ \sqrt{\frac{8G_k}{E\delta\delta_k}} \frac{l}{2} (1 + 3k) \frac{\cosh \sqrt{\frac{8G_k}{E\delta\delta_k}} x}{\sinh \sqrt{\frac{8G_k}{E\delta\delta_k}} l} + 3(1 - k) \right\} \quad (1.39)$$

A maksymalne naprężenia styczne mają postać:

$$\tau_{max} = \sigma_0 \left\{ \sqrt{\frac{G_k \delta}{8E\delta_k}} (1 + 3k) + 0,75 \frac{\delta}{l} (1 - k) \right\} \quad (1.40)$$

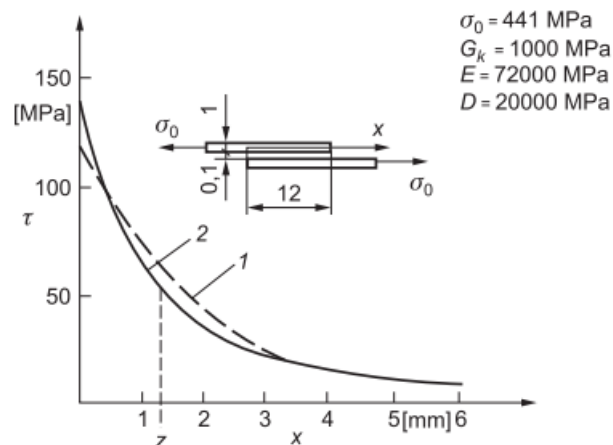
Maksymalne naprężenia styczne  $\tau_{max}$  obliczane według teorii Golanda-Reisnera, przy założeniu, że spoina klejowa nie jest obciążona momentem, są mniejsze w porównaniu z tymi obliczanymi w modelu Volkersena (rys. 1.20). Maksymalne naprężenia normalne w spoinie połączenia zakładkowego występują na krawędziach spoiny.



Rys. 1. 20. Porównanie rozkładów naprężeń stycznych w spoinie zakładkowego połączenia klejowego obliczonych metodami: Volkersena (V), Adamsa (A), Golanda-Reisnera (G-R)

Na rysunku 1.21 przedstawiono rozkład naprężeń stycznych w spoinie połączenia klejowego. Linia grubą zaznaczono naprężenia, w którego elementach została przekroczona granica plastyczności materiału, natomiast linią przerywaną zaznaczono rozkład naprężeń stycznych jaki wystąpiłby w tej spoinie przy identycznej wartości sił obciążających połączenia.

Zakładając stosunkowo korzystne warunki obciążenia połączenia, tj. cienkie elementy oraz wysoką wartość modułu umocnienia, wzrost maksymalnych naprężeń stycznych w spoinie spowodowany przekroczeniem granicy plastyczności materiałów klejonych, wynosi około 17%.



Rys. 1. 21. Rozkład naprężeń stycznych w spoinach zakładkowego połączenia klejowego jednakowo obciążonych przy: 1 – sprężystych odkształceniach obu elementów klejonych, 2 – przekroczeniu granicy plastyczności w elementach klejonych [46]

Nie ma wątpliwości, że prace wykonane przez Volkersena oraz Golanda i Reissnera były dużym krokiem naprzód w analizie naprężeń spoiny połączenia klejowego. Niemniej jednak

przedstawione przez nich modele miały ograniczenia, a mianowicie: w modelach nie uwzględniono zmian naprężeń w warstwie adhezyjnej wzdłuż jej grubości, podczas gdy naprężenia na styku warstwa adhezyjna i łączony element są wyjątkowo ważne, gdyż jest to właściwe miejsce destrukcji połączenia. Największe naprężenia styczne  $\tau$  występują na końcach zakładki, co pozostaje w sprzeczności z założeniem braku naprężeń na końcach zakładki. Analizy, które nie uwzględniły stanu wolnego od naprężeń stycznych przewartościowują naprężenia na końcach zakładki i mogą doprowadzić do niewłaściwego określenia parametrów wytrzymałościowych połączenia.

Późniejsze analizy i próby badawcze m.in. Ojalvo i Eidinoffa oraz Tsaia [86,87], którzy rozważyli zjawisko odkształcenia warstwy adhezyjnej wywołane nieprężeniami stycznymi w opracowaniu opartym na modelu Golanda i Reissnera dokładnie rozważyli zjawisko odkształcenia warstwy adhezyjnej wywołane naprężeniami stycznymi w celu oceny wpływu grubości spoiny klejowej na rozkład naprężeń. Naprężenia styczne w spoinie klejowej będą podlegały zmianie wzdłuż jej grubości. Założono również, że wartość naprężeń normalnych jest stała wzdłuż grubości spoiny. Wyniki pokazują, że zasadnicza różnica między teoriami,

w których uwzględnia się lub nie uwzględnia wpływ grubości warstwy adhezyjnej na rozkład naprężeń w połączeniu, dotyczy tylko rozkładu naprężeń na końcach zakładki połączenia. Zgodnie z przywołaną teorią, uwzględniając wpływ grubości warstwy adhezyjnej na rozkład naprężeń w spoinie połączenia, przyjmuje się, że maksymalne naprężenia styczne wzrastają, a naprężenia normalne maleją na końcach zakładki. Wpływ grubości warstwy adhezyjnej ma znaczenie dla krótkich zakładek, grubych warstw adhezyjnych i sztywnych klejów. W badaniach Ojalvo i Eidinoffa stwierdzono, że szczytowe naprężenia styczne występują na końcach zakładki. Dzięki czemu nie zostaje spełniony warunek występowania stref wolnych od naprężeń. Do podobnych wniosków doszedł również Allman, który w swoich badaniach zakładając iż maksymalne wartości naprężeń występują w okolicy końców zakładek [90].

Miejsca, w których występują największe wartości naprężeń stycznych w spoinie klejowej zależą od podatności na odkształcenia warstwy adhezyjnej. Rozwijając teorię Allmana, Chen i Cheng dowodzili, że miejsca o największych (maksymalnych) wartościach naprężeń stycznych w warstwie adhezyjnej znajdują się w odległości równej około 20% grubości klejonych elementów od krawędzi zakładki, a nie na jej końcach jak dotychczas zakładano. Natomiast opracowania Tsaia wykazały, że udoskonalenie modeli Volkersena i Golanda

oraz Reissnera poprzez uwzględnienie w nich założeń o deformacji łączonych elementów pod wpływem działania naprężeń stycznych znacznie lepiej koresponduje z wynikami badań eksperymentalnych [91].

Powyższe analizy przedstawiają zasadność uwzględnienia w rozważaniach dotyczących rozkładu naprężeń w spoinie klejowej odkształceń występujących w łączonych elementach. Pierwszym modelem, w którym uwzględniono deformację klejonych elementów zajęli się Renton i Winston, w którym przyjęto, że naprężenia warstwy adhezyjnej są stałe wzdłuż jej grubości i pomija się naprężenia normalne występujące wzdłuż długości spoiny. W modelu opracowanym przez Allmana, w którym naprężenia normalne prostopadłe do spoiny są zmienne wzdłuż grubości warstwy klejowej, warunek braku naprężeń stycznych na końcach zakładki połączenia był również spełniony. Podobnie jak w analizie Rentona i Winstona, Allman przyjął, że naprężenia styczne są stałe wzdłuż grubości warstwy klejowej i pominał naprężenia normalne występujące wzdłuż długości zakładki. Allman obliczył wartości momentów zginających i sił wywołujących ścinanie połączenia na jego końcach w oparciu o teorię Golanda i Reissnera [92]. Rozkłady naprężeń w elementach klejonych i w spoinie klejowej wyraził za pomocą funkcji rozkładu naprężeń spełniającej wszystkie równania równowagi i warunki brzegowe, w tym warunek braku naprężeń stycznych w warstwie adhezyjnej na końcach zakładki.

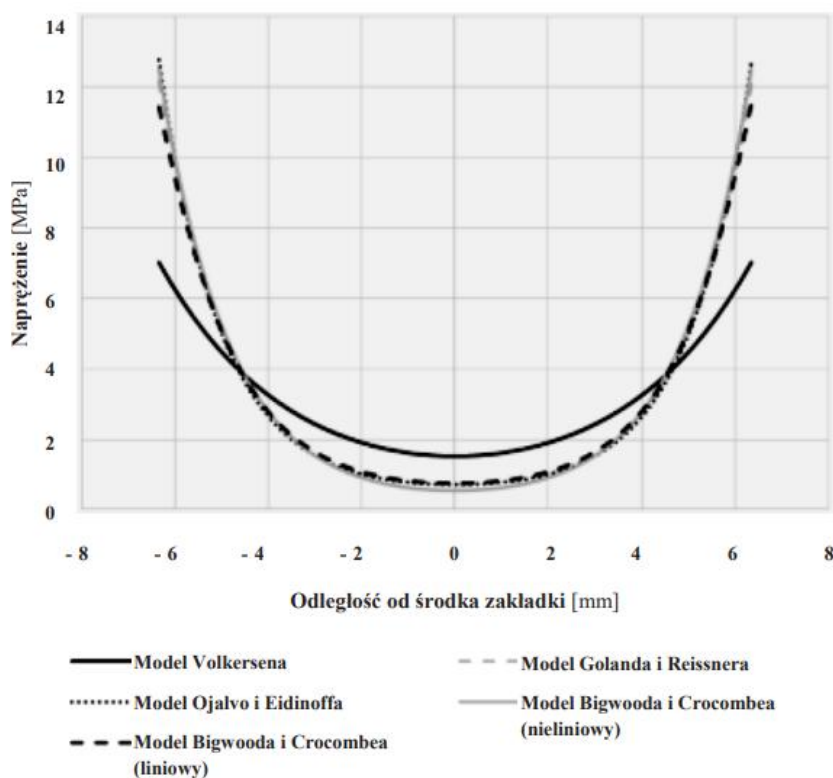
Kolejno Chen i Cheng [93], podobnie jak Allman, rozważali nieliniowe charakterystyki geometryczne połączeń jednozakładkowych, wykorzystując wartości obciążeń występujących na końcach zakładki połączenia. Jeśli klejone elementy są jednakowe obciążenia na dwóch końcach zakładki łączonych elementów będą sobie równe. Jednak w przypadku, gdy klejone elementy będą różnych wymiarów geometrycznych, rozkład naprężeń nie będzie symetryczny, a tym samym wartości naprężeń stycznych i normalnych prostopadłych do spoiny klejowej na dwóch końcach zakładki będą różne. Tak więc Chen i Cheng rozważyli przypadek połączenia jednozakładkowego niesymetrycznego – łączone elementy różniły się wymiarami. Analiza Adamsa i Mallicka [115] dotyczyła połączeń jedno- i dwuzakładkowych.

Należy także w tym miejscu przywołać publikację bazującą na dotychczasowych założeniach i osiągnięciach mianowicie analiza Zhao, Zhu i Lu [116]. Autorzy opracowali model, opierając analizę na dwuwymiarowej teorii sprężystości, która jednocześnie obejmuje zależności odkształcenie-przemieszczenie i naprężenie-odkształcenie. Metoda ta spełnia również warunek braku naprężeń stycznych na końcach zakładek połączenia. Z wyników badań

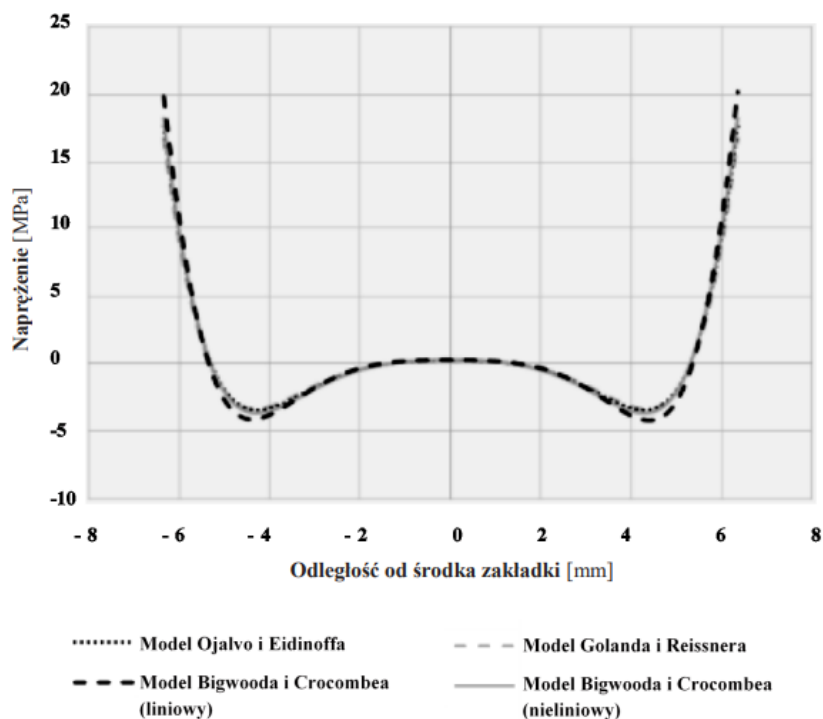
można stwierdzić m.in. wzrost dokładności otrzymywanych wyników od 4% do 13% w porównaniu do modelu Golanda i Reissnera dla tych samych warunków i geometrii.

Opisane powyżej modele analityczne, ciągle znajdują zastosowanie w obliczeniach wytrzymałościowych i nadal są punktem odniesienia dla nowych rozwiązań dotyczących połączeń adhezyjnych. Dodatkowo wskazane modele analityczne są relatywnie proste w użyciu i nie konieczne jest posiadanie wyspecjalizowanych stacji roboczych.

Na rysunku 1.22 porównano rozkład naprężeń stycznych  $\tau$  oraz na rysunku 1.23 rozkład naprężeń normalnych  $\sigma$  w funkcji odległości od środka zakładki, gdzie umiejscowiono początek układu współrzędnych. W modelu Volkersena „przeszacowane” są wartości naprężeń  $\tau$  w środku zakładki, natomiast niedoszacowane są naprężenia styczne na końcach zakładki, która to lokalizacja jest krytyczna w aspekcie wytrzymałości połączenia



Rys. 1. 22. Porównanie rozkładów naprężeń stycznych zakładkowego połączenia klejowego wybranych modeli analitycznych [88]



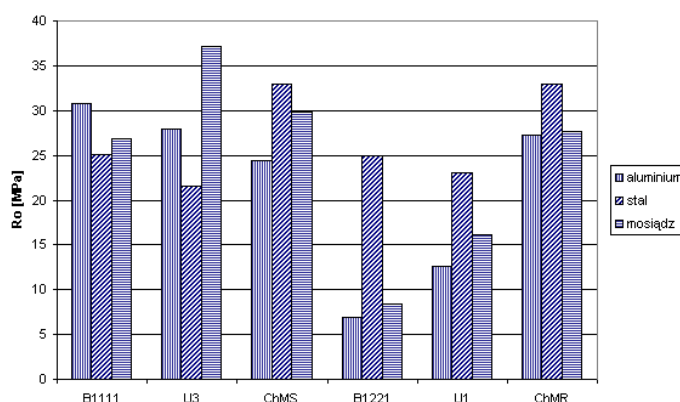
Rys. 1. 23. Porównanie rozkładów naprężeń normalnych zakładkowego połączenia klejowego wybranych modeli analitycznych [88]

Warto również zauważyć, że z powodu braku uwzględnienia przez Volkersena wtórnych momentów gnących oraz przyjęcia założenia, że warstwa adhezyjna ulega odkształceniu tylko pod wpływem naprężeń stycznych, analiza z wykorzystaniem tego modelu nie umożliwia oszacowania rozkładu naprężeń normalnych  $\sigma$  (rys. 1.23). Wyniki obliczeń uzyskane za pomocą pozostałych modeli (z wyjątkiem Volkersena) mają bardzo zbliżone wartości, co z punktu widzenia analizy inżynierskiej jest dowodem na to, jak wielkie znaczenie miała ewolucja modelu Volkersena do postaci analizy opracowanej przez Golanda i Reissnera. Późniejsze i bardziej złożone modele analityczne, jak np. modele Ojalva i Eidinoffa czy Bigwooda i Crocombe (rys. 1.22 i rys 1.23), mają stosunkowo marginalny wpływ na podwyższenie dokładności obliczeń, przy jednoczesnym znacznym zwiększeniu czasu obliczeniowego.

Badania eksperymentalne opracowane przez Domińczuka [37] wskazują, iż w połączeniach klejowych obciążonych na ścinanie występuje optymalna, z punktu widzenia wytrzymałości połączenia, grubość spoiny klejowej. Rysunek 1.26 przedstawia wykres wpływu grubości spoiny klejowej na siłę niszczącą połączenie klejowe dla zakładkowego połączenia klejowego.

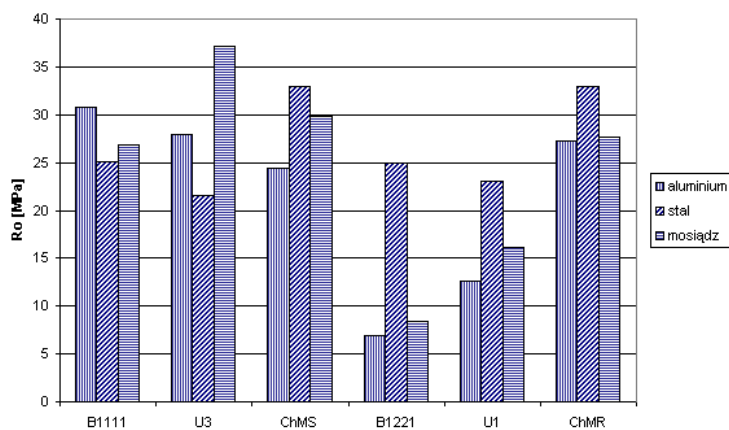
W pracy [27] Kuczmazewskiego przedstawiono wyniki badań określające zmiany sztywności kleju epoksydowego w zależności od grubości spoiny klejowej. W połączeniach klejowych metali, w strefie przyściennej klejonych elementów, występuje cienka warstwa o odmiennych właściwościach względem rdzenia spoiny. W spoinach o niewielkiej grubości istotny może być wpływ właściwości strefy przyściennej na uogólnioną wartość modułu Younga. Przedstawiono wyniki badań wytrzymałości połączenia klejowego, wykazujące spadek wytrzymałości na rozciąganie połączenia doczołowego wraz ze wzrostem grubości spoiny. Spadek wytrzymałości połączenia częściowo jest związany z regresją wartości modułu Younga w spoinach o większej grubości. Ma to także związek z występowaniem wad struktury, takich jak pęcherze gazowe, rzadzizny, które mogą intensyfikować wpływ grubości skleiny na jej wytrzymałość.

Odnosząc się do wymiarowości spoiny w przypadku zakładkowego połączenia klejowego nie bez znaczenia pozostaje zastosowanie odpowiedniego kleju. Jest to jeden z podstawowych warunków uzyskania wysokiej wytrzymałości połączenia klejowego. Odpowiedni dobór kleju musi uwzględniać przede wszystkim rodzaj łączonych materiałów, gdyż nie wszystkie substancje klejowe równie dobrze łączą różne materiały. Porównując właściwości wytrzymałościowe określonej grupy klejów, należy także uwzględnić warunki pracy połączenia oraz warunki utwardzania się tego kleju. Kleje utwardzane na gorąco wykazują lepsze warunki wytrzymałościowe w porównaniu z klejami utwardzanymi na zimno. Wymagają one jednak dużych nacisków utwardzania, np. dla klejów epoksydowych  $\sim 0,25$  MPa, dla klejów fenolowych  $\sim 0,7$  MPa [35]. Kleje konstrukcyjne mogą wykazywać różne właściwości mechaniczne określane wartościami naprężeń i odkształceń niszczących (rys. 1.24).



Rys. 1. 24. Wartości naprężenia dla wybranych materiałów dla wybranych rodzajów klejów [35]

Używanie klejów o dużej sztywności zaleca się do klejenia elementów sztywnych o małej powierzchni sklejenia. Kleje z tej grupy charakteryzuje większa wartość naprężeń niszczących niż w przypadku klejów elastycznych. Takie kleje należy stosować w konstrukcjach silnie obciążonych, w których łączone materiały charakteryzują się wysokimi właściwościami wytrzymałościowymi oraz nie istnieje możliwość zwiększenia długości zakładki. Kleje z grupy klejów elastycznych najlepiej nadają się do łączenia materiałów kruchych. Używane są do łączenia materiałów o niskich właściwościach wytrzymałościowych, gdzie duża jest długość zakładki oraz w przypadku, gdy konstrukcja będzie ulegała dużym odkształceniom podczas eksploatacji. Kleje wykazują różną wytrzymałość adhezyjną przy łączeniu różnych materiałów, dzieje się tak nawet przy zastosowaniu identycznych zabiegów przygotowania ich powierzchni do klejenia (rys. 1.25).



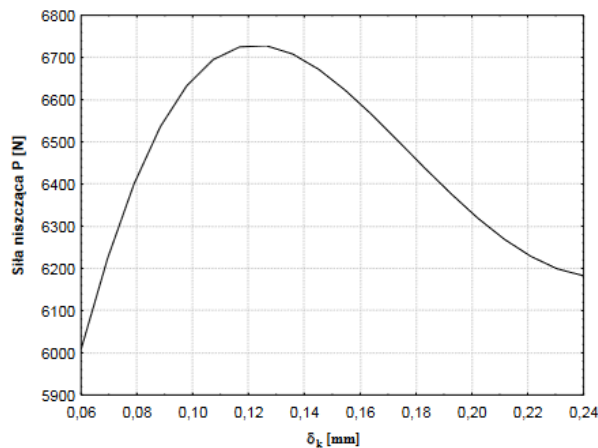
Rys. 1. 25. Porównanie wytrzymałości na odrywanie klejowych mas regeneracyjnych zastosowanych do łączenia różnych stopów metalicznych

Wytrzymałość połączeń klejowych obciążonych na ścinanie i oddzieranie zależy również od modułu sprężystości kleju ( $G_k$ ,  $E_k$ ). Największe znaczenie praktyczne mają połączenia obciążone na ścinanie, dlatego ocena właściwości wytrzymałościowych klejów konstrukcyjnych powinna polegać na określeniu ich zdolności do przenoszenia obciążeń w takich właśnie połączeniach. Wzór (1.39) określa współczynnik  $\beta$ , który jest parametrem określającym ilościowo zdolność do przenoszenia obciążeń przez substancję klejową.

$$\beta = \frac{\tau_n}{\sqrt{G_k}} \quad (1.41)$$

W praktyce oznacza to, im większa wartość współczynnika  $\beta$  tym dany klej umożliwia wykonanie połączenia obciążonego na ścinanie o większej wytrzymałości doraźnej.

Prawidłowe zaprojektowanie konstrukcji pozwala uzyskać wysokowytrzymałe połączenie klejowe, gdyż nie w każdym układzie konstrukcyjnym spoina klejowa może przenosić duże obciążenia. Połączenie klejowe powinno być zaprojektowane, pod względem kształtu, wymiaru i sposobu obciążenia, aby w spoinie dominowały naprężenia normalne ujemne, czyli ściskające oraz naprężenia styczne. Naprężenia normalne dodatnie, czyli rozciągające wpływają na stopień wyczerpania spoiny określony według hipotezy maksymalnych naprężeń normalnych dodatnich. Występowanie takiego typu naprężeń w spoinach klejowych jest niepożądane. Najlepszym rozwiązaniem konstrukcyjnym złącza klejowego jest to w którym spoina klejowa jest równomiernie ściskana. Natomiast tym najmniej wskazanym jest takie, w którym spoina jest obciążona na oddzieranie i występuje w niej duże spiętrzenie naprężeń normalnych dodatnich.



Rys. 1. 26. Zależność wytrzymałości zakładkowych połączeń klejowych klejonych klejem Epidian 57/PAC/100:80 od grubości spoiny klejowej dla  $l=12$  [mm],  $\delta=2$  [mm],  $Rq=2$  [ $\mu\text{m}$ ] [37]

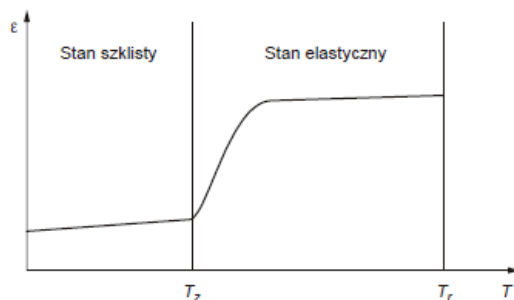
Kleje ze względu na możliwość uzyskania określonej wytrzymałości połączenia dzieli się na [43]:

- przylepcowe, takie, w których minimalna wytrzymałość uzyskania określonej wytrzymałości wystarcza jedynie do odwracalnego połączenia dwóch elementów;
- montażowe, takie w których średnia wytrzymałość umożliwia trwałe połączenie, lecz nie jest wystarczająca, aby złącze to było elementem konstrukcyjnym;
- konstrukcyjne, takie, które ma tyle dużą wytrzymałość, że złącza można traktować jako element konstrukcyjny.

Kleje konstrukcyjne są tworzywami syntetycznymi, których głównym składnikiem jest żywica (oligomer) podlegająca utwardzeniu inaczej usieciowaniu pod wpływem kilku

czynników, tj.: środka sieciującego dodanego bezpośrednio przed użyciem, środka sieciującego znajdującego się już w kleju i aktywującego się w określonych warunkach, określonych czynników zewnętrznych np. temperatura, wilgoć, promieniowanie ultrafioletowe.

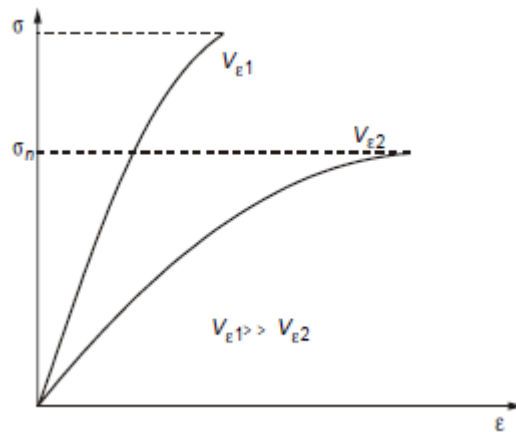
W trakcie procesu sieciowania ze związków o budowie łańcuchowej lub rozgałęzionej tworzy się struktura przestrzenna będąca jedną wielką makrocząsteczką. Bardzo ważną cechą dla tej struktury jest stopień jej usieciowania. Mocno usieciowane tworzywa charakteryzuje większa wytrzymałość, sprężystość oraz sztywność. Mają jednak mniejszą odkształcalność i wskazują właściwości ciał kruchych aniżeli tworzywa słabo usieciowane. Wzrost temperatury tworzywa o strukturze słabo usieciowanej może spowodować przejście ze stanu szklanego w stan elastyczny (rys. 1.27), dalszy przyrost temperatury nie spowoduje przejścia do stanu plastycznego, gdyż występujące połączenia chemiczne są bardzo trwałe. Gdy temperatura rozkładu  $T_r$  zostanie przekroczona, następuje zerwanie połączenia sieciowego.



Rys. 1. 27. Krzywa termomechaniczna tworzywa zbudowanego z makrocząsteczek o małej gęstości usieciowania,  $T_z$  – temperatura zeszklenia,  $T_r$  – temperatura rozkładu,  $\epsilon$  – odkształcenie względne [44]

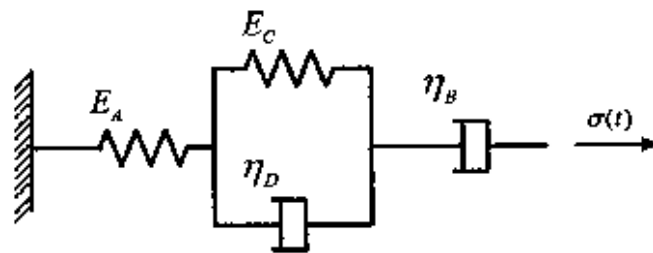
Zważywszy na fakt, iż kleje konstrukcyjne są tworzywami wielocząsteczkowymi utwardzonymi można przyjąć, że mogą występować w stanie tylko szklanym, gdzie charakteryzuje je mocne usieciowanie oraz w stanie szklanym lub elastycznym, gdzie charakteryzuje je słabe usieciowanie.

Na właściwości mechaniczne klejów konstrukcyjnych o strukturze słabo usieciowanej istotny wpływ ma wzrost temperatury, który wywołuje ich zmianę. Tworzywa wielocząsteczkowe mogą wykazywać w różnym stopniu właściwości lepkosprężyste, to znaczy występuje zależność wartości modułów sprężystości i naprężeń niszczących od prędkości odkształcenia (rys. 1.27). Liniową lepkosprężystość materiałów dobrze odwzorowuje model Burgersa [45] przedstawiony na rysunku 1.28.

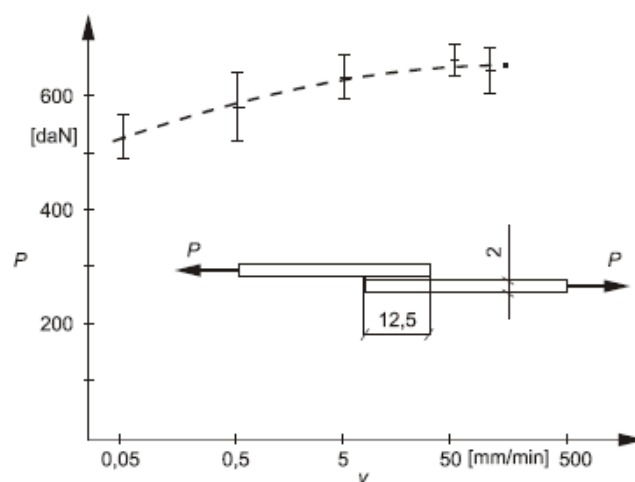


Rys. 1. 28. Krzywe rozciągania materiału lepkosprężystego dla dwóch różnych prędkości odkształcenia,  $\sigma$  – naprężenie,  $\varepsilon$  – odkształcenie względne,  $V_{\varepsilon}$  – prędkość odkształcenia [44]

Branie pod uwagę lepkości jest istotne przy analizie statycznej trwałości czasowej połączenia klejowego, gdzie wytrzymałość połączenia klejowego jest poddawana długotrwałemu obciążeniu oraz ich trwałości zmęczeniowej, niż przy wytrzymałości doraźnej.



Rys. 1. 29. Model Burgersa ciała liniowo lepkosprężystego, ( $E_A$ ,  $E_C$ ,  $\eta_B$ ,  $\eta_D$  – współczynniki lepkosprężystości) [45]



Rys. 1. 30. Zależność wytrzymałości  $P$  połączeń klejowych obciążonych na ścinanie od prędkości  $v$  przesuwu uchwytów maszyny wytrzymałościowej [46]

Poddając analizie wytrzymałość doraźną połączeń klejowych wykonanych z zastosowaniem wysokowytrzymałych klejów konstrukcyjnych najczęściej pomijane są ich lepkość sprężystości przyjmując, że wykazują one właściwości przybliżone do ciał sprężystych. Przeprowadzone badania wpływu prędkości obciążenia próbek połączeń zakładkowych na ich wytrzymałość opracowane przez Godzimirskiego (rys. 1.30), wykazały, że w przedziale prędkości 5 – 95 mm/min wytrzymałość połączeń nie zależała od prędkości odkształcenia [46]. Przy niższych prędkościach zauważono już spadek wytrzymałości, przykładowo przy prędkości 0,05 mm/min spadek wyniósł 18,5%.

Klej, podobnie jak każdy inny materiał konstrukcyjny, również w postaci spoiny jak i utwardzonego tworzywa charakteryzuje się ze względów wytrzymałościowych następującymi wielkościami mechanicznymi:

- naprężenia niszczące normalne  $\sigma_n$  lub styczne  $\tau_n$ ,
- moduł sprężystości wzdłużnej  $E_k$  lub postaciowej  $G_k$ ,
- współczynnik Poissona  $\nu_k$ ,
- odkształcenie niszczące  $\varepsilon_n$ .

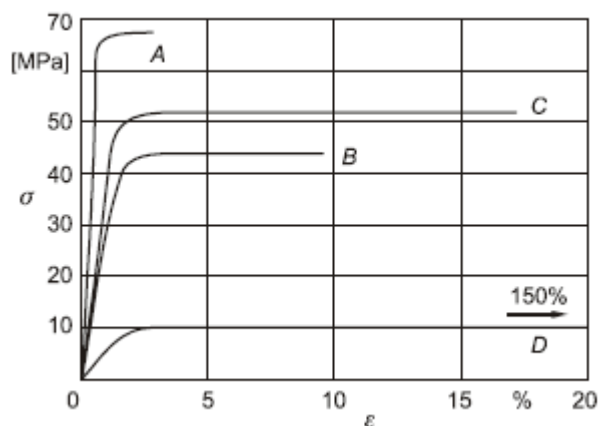
Krzywe rozciągania (rys. 1.31) obrazują te wielkości w zależności naprężeń od odkształceń:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon) \quad (1.42),$$

$$\tau = \tau(\gamma) \quad (1.43),$$

które to naprężenia dla różnych klejów mają jakościowo ten sam charakter zmian, jednak różnica jest w nachyleniu liniowej części charakterystyki, poziomemu naprężeń maksymalnych oraz wartości odkształceń niszczących (rys. 1.31). Krzywa zależności naprężenia od odkształcenia oznaczona literą A jest charakterystyczna dla klejów występujących w stanie szklistym, dla klejów stosunkowo kruchych i zasadniczo każdy klej w odpowiednio niskiej temperaturze może wykazywać takie właściwości. Kruche kleje konstrukcyjne takie właśnie cechy wykazują w temperaturze otoczenia. Krzywa oznaczona literą D jest charakterystyczna dla klejów będących w stanie wysokoelastycznym. Kleje konstrukcyjne, które mają małą gęstość utwardzania mogą takie właściwości wykazywać w podwyższonej temperaturze, wyższej od temperatury zeszklenia. Krzywe oznaczone literami B i C są charakterystyczne dla nowych wzmocnionych klejów konstrukcyjnych. Wskazane właściwości można uzyskać poprzez odpowiednią modyfikację klejów. Taką modyfikację, w wyniku której w trakcie utwardzania następuje wydzielanie się fazy kauczukowej w postaci sferycznych domen.

Zastosowanie tego typu klejów, wzmocnionych, zapewnia dużą wytrzymałość połączeń obciążonych na oddzieranie i obciążanych impulsowo.



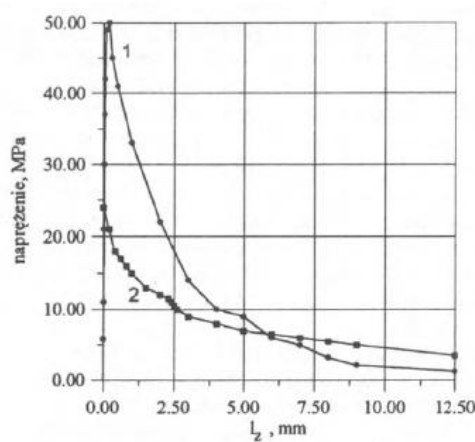
Rys. 1. 31. Krzywe rozciągania klejów o różnych właściwościach mechanicznych, A – klej konstrukcyjny, B – klej konstrukcyjny wzmocniony, C – klej konstrukcyjny wzmocniony, D – klej w stanie elastycznym,  $\sigma$  – naprężenie,  $\varepsilon$  – odkształcenie względne [43]

W analizach wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych zakładkowych lepkość jest pomijana, zakłada się wówczas ich liniową sprężystość, dla uproszczenia. Większość klejów wskazuje jednak wyraźną nieliniowość zależności wg wzoru (1.43) wyznaczonej zazwyczaj w próbie rozciągania płaskich próbek wykonanych z utwardzonego kleju [46]. Zważywszy na ten fakt, należy przyjmować taką zastępczą wartość modułu sprężystości kleju, aby wyniki obliczeń były objęte jak najmniejszym błędem.

Obecnie w laboratoriach chemicznych powstają kleje o coraz lepszych właściwościach wytrzymałościowych i użytkowych. Należy zaznaczyć jednak, że nawet najlepszy klej konstrukcyjny nie spełni swojego zadania, jeśli złącze klejowe zostanie źle zaprojektowane. Zaprojektowanie połączeń klejowych uważa się za właściwe, gdy zachowana jest znajomość rozkładu naprężeń w spoinach klejowych i zastosowanie takich rozwiązań konstrukcyjnych wykonywanych połączeń, które gwarantowałyby nieprzekraczanie dopuszczalnego stopnia wyężenia spoiny ze względu na ich wytrzymałość doraźną, statyczną trwałość czasową oraz trwałość zmęczeniową.

Kolejnym niebagatelnym czynnikiem konstrukcyjnym mającym wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych jest długość linii brzegowej zakładki. Badania wytrzymałości zakładkowych połączeń klejowych w funkcji długości linii brzegowej w miejscu klejenia wykazały wzrost wytrzymałości połączenia wraz ze wzrostem długości linii brzegowej. Dowodzą temu wyniki zaprezentowane w pracy autorstwa Melogranaa, Grenestedta oraz

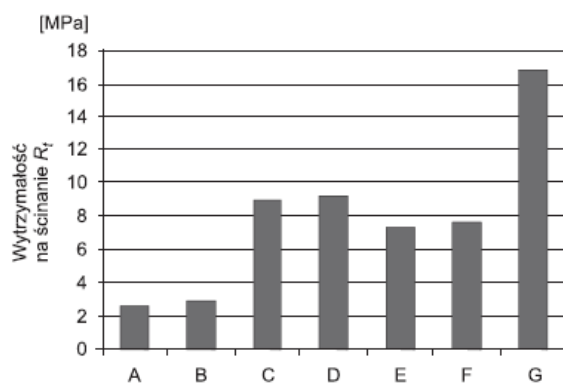
Maroun [49]. Efekt ten należy wiązać z istnieniem wypłytki na brzegu skleiny, która zwiększa powierzchnię styku. Badania prezentowane w opracowaniach [37,50] ujawniają, iż wpływ wielkości wypłytki jest nieco większy niż wynikający z analizy geometrycznej. Badania numeryczne wykazały, że na efekt zwiększenia naprężenia niszczącego wraz ze wzrostem długości linii brzegu miejsca sklejenia wpływa także zmniejszenie się naprężenia na końcach zakładki połączenia klejowego. Przykładowy rozkład naprężenia stycznego wzdłuż długości zakładki analizowany w pracy Kuczmaszewskiego [27] dla połączenia klejowego bez wypłytki oraz dla połączenia z wypływką ( rys. 1.32).



Rys. 1. 32. Rozkład naprężenia stycznego wzdłuż długości zakładki:  $E_k=3500[\text{MPa}]$ ,  $E=2,1 \times 10^5[\text{MPa}]$ ,  $\delta=2[\text{mm}]$ ,  $l=25[\text{mm}]$ ,  $P=2700[\text{N}]$ ,  $\tau_u=5,4[\text{MPa}]$ , 1-połączenie bez wypłytki, 2-połączenie z wypływką [27]

Wypłytki kleju na krawędziach łączonych elementów powodują zmianę rozkładu naprężeń w spoinach klejowych polegającą na ich wyrównaniu w strefie przykrawędziowej i zmniejszeniu ich wartości maksymalnych [68]. Powstanie wypływek kleju może zwiększyć wytrzymałość połączenia o 10-20 %.

Wytrzymałość spoiny adhezyjnej zależy w dużej mierze od prawidłowo przygotowanej powierzchni łączonych elementów [6,51]. Odpowiednie przygotowanie powierzchni materiałów jest istotnym warunkiem uzyskania połączeń klejowych o założonych właściwościach [52]. Właściwe przygotowanie powierzchni łączonych elementów jest niezbędnym warunkiem uzyskania wysokiej wytrzymałości połączenia klejowego. Od stanu fizyczno- chemicznego warstwy wierzchniej powierzchni klejonych elementów zależy wytrzymałość adhezyjna spoiny klejowej, która wpływa na ogólną wytrzymałość spoiny (rys. 1.33).



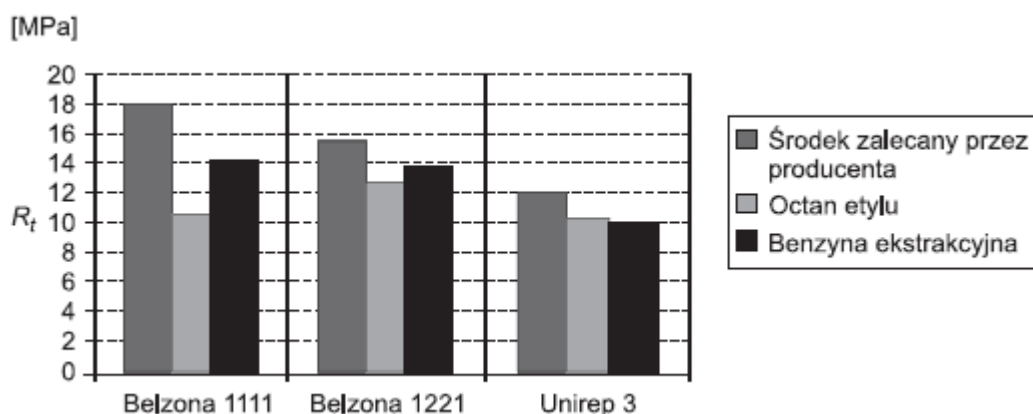
Rys. 1. 33. Wpływ sposobu przygotowania powierzchni blach gatunku 2024T4 na wytrzymałość na ścinanie klejowej masy regeneracyjnej Belzona 1221: A – schropowacenie papierem ściernym nr 150 i mycie benzyną, B – schropowacenie papierem ściernym nr 150 i mycie odtłuszczaczem firmowym, C – piaskowanie gruboziarnistym elektrokorundem i mycie odtłuszczaczem firmowym, D piaskowanie drobnoziarnistym elektrokorundem i mycie odtłuszczaczem firmowym, E – piaskowanie gruboziarnistym elektrokorundem za pomocą pistoletu laboratoryjnego i mycie odtłuszczaczem firmowym, F – piaskowanie drobnoziarnistym elektrokorundem za pomocą pistoletu laboratoryjnego i mycie odtłuszczaczem firmowym, G – trawienie zgodnie z PN-69/C- 89300[68]

Zwiększenie aktywności fizycznej powierzchni można uzyskać stosując specjalne obróbki powierzchniowe. Wybór sposobu przygotowania powierzchni, w tym wybór odpowiednich operacji technologicznych jest uzależniony od szeregu czynników. Najistotniejszym czynnikiem wpływającym, jak już wspomniano jest rodzaj materiałów tworzących połączenie adhezyjne. W zależności od typu łączonych materiałów może wystąpić konieczność usuwania wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń lub modyfikowanie powierzchni materiału. Proces modyfikowania powierzchni zewnętrznej materiału może spowodować zwiększenie chropowatości powierzchni, poprawę zwilżalności, zmiany struktury warstwy wierzchniej oraz zwiększenie swobodnej energii powierzchniowej [53-55]. Podczas przygotowania powierzchni następuje usunięcie zanieczyszczeń z warstwy wierzchniej materiału będących m.in. pozostałościami procesów przetwórczych, np. walcowania, obróbki skrawaniem. Może to również być usuwanie powierzchni stanowiących ochronę przed korozją podczas magazynowania i transportowania. Podczas klejenia metali zalecane jest również usunięcie luźno związanych tlenków metodami chemicznymi lub mechanicznymi. Jest to istotne zwłaszcza dla tlenków żelaza, które są słabo związane z podłożem tworząc połączenia adhezyjne osłabiając warstwę graniczną [27]. Natomiast tlenki stopów aluminium mocno związane są z podłożem, dla nich z kolei zalecane jest anodowanie. Klejenie nie zabezpiecza w dostatecznym stopniu powierzchni przed oddziaływaniem tlenu, przed korozją. Metalowy element podatny na korozję w połączeniu klejowym nadal będzie podatny na korozję i wystąpi

tam utlenianie powierzchni, co z kolei powoduje spadek wytrzymałości tego połączenia w czasie.

Przy przygotowaniu powierzchni mogą także zachodzić zmiany struktury geometrycznej powierzchni poprzez zwiększenie jej chropowatości [56]. Zjawisko to opisywane jest w opracowaniu Komorek i Przybyłek [56], gdzie w wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż obróbka strumieniowo-ścierna znacząco zwiększa chropowatość powierzchni, lecz nie zawsze poprawia wytrzymałość połączenia, a szorstkowanie poprzecznie do kierunku działania sił ścinających powoduje znaczną poprawę jakości połączenia przy zminimalizowaniu czasu przygotowania powierzchni. Nadmierne schropowacenie powierzchni przeznaczonych do klejenia może powodować osłabienie wytrzymałości połączenia, jeżeli masa klejowa nie jest w stanie zwilżyć wgłębień nierówności powierzchni. W badaniach eksperymentalnych przeprowadzonych przez Harsana [72] udaje się wyznaczyć optymalną chropowatość powierzchni przygotowanych do klejenia metodami mechanicznymi.

Na proces przygotowania powierzchni mogą składać się różnego typu operacje [5], m.in.: odtłuszczenie, obróbka za pomocą metod mechanicznych, chemicznych oraz elektrochemicznych, płukanie, suszenie, operacje specjalne związane z modyfikacją warstwy wierzchniej. Najczęściej stosuje się obróbki mechaniczne z uwagi na ich łatwość wykonania tj.: piaskowanie, szrotkowanie, schropowacenie płótnami ściernymi. Obróbki chemiczne i elektrochemiczne natomiast dają lepsze rezultaty, należy jednak pamiętać że nie wszystkie kleje są jednakowo czułe na stan warstwy powierzchniowej wynikający ze sposobu przygotowania powierzchni klejenia. Badania przeprowadzone przez Godzimirskiego wskazują, że obróbka chemiczna jest znacznie korzystniejsza w przypadku przygotowania powierzchni do klejenia stopów aluminium niż stali [71]. Klejone powierzchnie powinny być czyste, pozbawione tłuszczów, które dla dużej ilości klejów stanowią przeszkodę w kontakcie z klejoną powierzchnią. Preferowanymi środkami odtłuszczającymi są odtłuszczacze firmowe, produkowane i zalecane przez producentów klejów i innych tworzyw adhezyjnych dedykowane dla swoich wyrobów (rys. 1.34).



Rys. 1. 34. Wpływ rodzaju zastosowanego środka odłuszczonego na wytrzymałość na ścinanie klejowych mas regeneracyjnych (blachy stalowe piaskowane) [67]

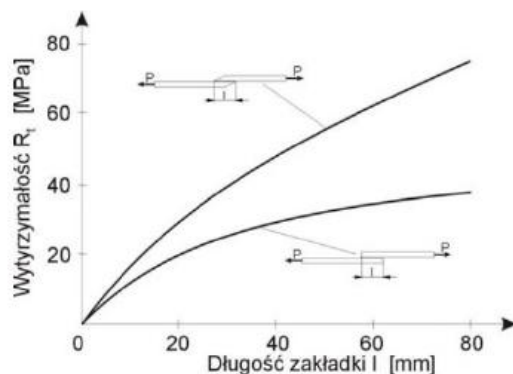
Niemniej ważne znaczenie przygotowania powierzchni, zwłaszcza jako czynnik zwiększający adhezję oraz wytrzymałość podczas wykonywania połączeń adhezyjnych, w tym klejowych, jest opisywane i podkreślane w wielu pracach [57-62]. W opracowaniu Rudawskiej przedstawiono zarówno charakterystykę metod przygotowania powierzchni materiałów przeznaczonych do klejenia, jak również informacje dotyczące przygotowania powierzchni dla wskazanych grup materiałów, biorąc pod uwagę procedury przeprowadzania tychże procesów przygotowawczych [51].

Nie należy zapominać, że czystość klejonych powierzchni jest warunkiem koniecznym, lecz nie zawsze wystarczającym by uzyskać dużą wytrzymałość połączenia klejowego.

#### 1.2.4 Modyfikacje konstrukcyjne elementów klejonych wpływające na poprawę ich wytrzymałości

Znaczącym czynnikiem konstrukcyjnym mającym wpływ na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych oraz tym opisywanym i badanym w niniejszej pracy jest zmiana geometrii w obrębie brzegów zakładkowego połączenia klejowego. Na wytrzymałość konstrukcyjną zakładkowego połączenia klejowego ma wpływ zmiana geometrii przykrawędziowej, a mianowicie ukosowanie końców zakładki. W związku z tym, iż maksymalne naprężenia występują w spoinie klejowej na krawędziach, dlatego dążąc do zmniejszenia tych naprężeń stosuje się ukosowanie krawędzi łączonych elementów [63]. W opracowaniu [64] przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań dla połączeń jednozakładkowych, w których krawędzie zakładek ścięto pod kątem 90°, 45°, 30° i 15°. Wskazane wyniki po badaniach

wytrzymałościowych na rozciąganie, gdzie zastosowano jednakową prędkość wzrostu obciążenia, wykazały, że ukosowanie ma pozytywny wpływ na zwiększenie wytrzymałości połączenia zakładkowego (rys. 1.35). Im większy kąt ukosowania tym większa wytrzymałość połączenia [64].



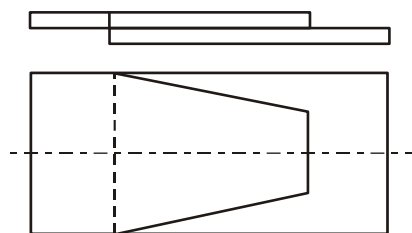
Rys. 1. 35. Wpływ ukosowania końców zakładki na wytrzymałość połączenia zakładkowego na ścinanie [35]

Dzięki ukosowaniu brzegów klejonych elementów można zmniejszyć ich sztywność. Ma to korzystny wpływ na wzrost wytrzymałości połączenia poprzez wyrównanie rozkładu naprężeń stycznych w spoinie klejowej [35]. Zmniejszenie sztywności połączenia klejowego w strefie przykrawędziowej uzyskane poprzez zewnętrzne ukosowanie krawędzi zakładki powoduje zmniejszenie wartości współczynnika kształtu i wzrost wytrzymałości połączenia na ścinanie, rosnącej wraz ze wzrostem kąta ukosowania. W tabeli 1.1 podano wyniki badań [72] wpływu kąta ukosowania blach połączeń zakładkowych według wymiarów zakładek zgodnie z PN-69/C-89300 na wytrzymałość  $R_t$  połączeń klejonych klejem Epidianem 57/Z1, powierzchni blach trawionych, utwardzanych 353 K, 1h.

Tab.1. 1. Wyniki badań wpływu kąta ukosowania blach połączeń zakładkowych [72]

Kąt ukosowania krawędzi klejonych blach	90°	45°	30°	15°
Siła niszcząca, daN	625±82	675±26	706±45	915±43

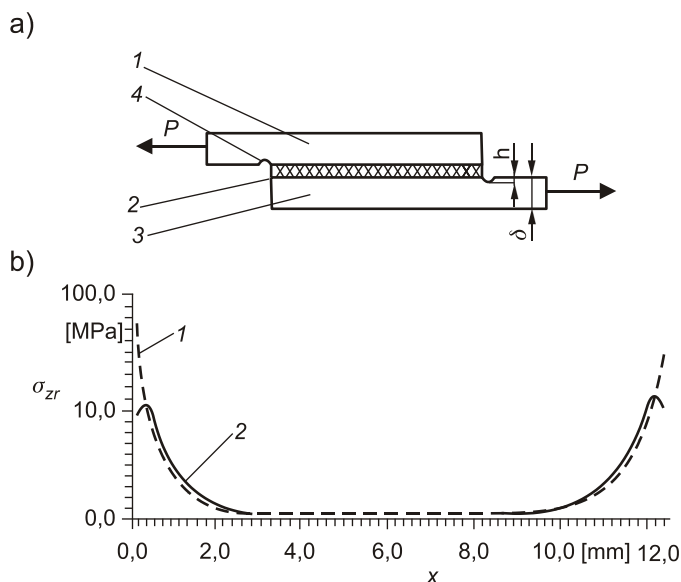
Równomierne ukosowanie klejonych blach wzdłuż całej długości zakładki pozwala w jeszcze większym stopniu zwiększyć wytrzymałość tego połączenia. Staje się to problematyczne w przypadku obróbki cienkich blach, przy łączeniu elementów cylindrycznych, obciążonych momentami skręcającymi lub siłami wzdłużnymi, zastosowanie równomiernej zmiany sztywności elementów klejonych wzdłuż całej długości zakładki jest łatwiejsze do zrealizowania [64].



Rys. 1. 36. Sposób kształtowania klejonego elementu połączenia zakładkowego przy ukosowaniu wzdłuż zakładki

Zmiana kształtu klasycznego połączenia zakładkowego obciążonego na ścinanie, która polega na równomiernym zmniejszeniu szerokości jednej blachy na odcinku zakładki zapewnia bardziej równomierny rozkład naprężeń stycznych w spoinie (rys. 1.36) Rys. 1. 37. Wpływ podcięcia na wytrzymałość połączenia zakładkowego. Mimo uzyskania mniejszej powierzchni styku, połączenie takie może przenosić takie samo obciążenie, jak połączenie klasyczne bez zmiany kształtu łączonych elementów.

Przeprowadzone badania numeryczne wykazują, że możliwe jest zwiększenie wytrzymałości połączeń obciążonych na ścinanie poprzez wykonanie niewielkiego rowka wzdłuż krawędzi spoiny, (rys. 1. 37) Wykonane podcięcie osłabia klejone elementy, ale powoduje obniżenie wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych w spoinie klejowej i odsuwa maksymalne naprężenia od krawędzi spoiny.



Rys. 1. 37. Wpływ podcięcia na wytrzymałość połączenia zakładkowego

Wszystkie zabiegi konstrukcyjne, w wyniku których obniżeniu ulegają maksymalne naprężenia zredukowane w spoinie klejowej należy uznać za właściwe, gdyż powodują one zwiększenie wytrzymałości połączenia [64]. Szczególnie zaleca się takie rozwiązania

projektowe połączeń klejowych, które zabezpieczają spoinę przed przypadkowym zniszczeniem.

Na zmianę nośności połączeń klejowych mają wpływ także takie zmiany geometrii jak wypływki i fazowania. W opracowaniu poświęconym temu zagadnieniu [102], Belingardi, Goglio, i Tarditi wykazali wpływ zmian geometrii zakładki na pole naprężeń w celu optymalizacji, identyfikując konfigurację geometryczną, która minimalizuje szczyty naprężeń. Zadowalające wyniki w zakresie redukcji naprężeń można osiągnąć poprzez zastosowanie końcówki klejącej typu wylewowego, dla odpowiednio zróżnicowanej geometrii wylewek. Dalszą poprawę można uzyskać dzięki zastosowaniu końcówki typu wylewowego oraz odpowiedniemu fazowaniu. Przyjmując takie rozwiązanie można uzyskać lepsze rezultaty rozkładu naprężeń, naprężenia odrywającego oraz naprężenia ścinającego w maksymalnych wartościach naprężenia w warstwie kleju. Na przestrzeni wielu lat, prowadzone są badania nad zwiększeniem nośności i optymalizacją rozkładu naprężeń w spoinie jednozakładowego połączenia klejowego [103-105], zwłaszcza poprzez fazowanie i wprowadzanie zaokrągleń na czołowej części zakładki. Przypatrując się pracy Belingardi i inni [106] można dostrzec w jaki sposób szczegóły geometryczne wpływają na wytrzymałość połączeń zakładkowych. Zbadali oni wpływ zaokrąglenia i wewnętrznego kąta fazowania na końcach obciążonych elementów klejonych na właściwości mechaniczne połączeń i przedstawili wyniki z modelu elementów skończonych. Wykazano, że im mniejszy jest kąt zaokrąglenia i wewnętrzny kąt fazowania na końcach zakładki, tym mniejszy jest rozkład naprężeń. Podobne analizy przeprowadził Hildebrand [107], mianowicie badał różne kształty zakładki połączenia klejowego uzyskane poprzez zwężanie, zaokrąglenie lub wgniecenie. Wyniki jego przewidywań numerycznych sugerują, że dzięki starannemu zaprojektowaniu czołowej strefy zakładki wytrzymałość połączenia klejowego można zwiększyć o 90-105%. Avila [105] wykonał badania nad pojedynczym złączem zakładkowym w kształcie fali wzdłuż zakładki i wykazał tym bardziej równomierny rozkład naprężeń. W drodze eksperymentu i symulacji uzyskał wyższą wytrzymałość połączenia. Dodatkowo, w innych publikacjach wskazano, że faza wykonana w obrębie złącza [111,112] lub moduł sprężystości kleju [108-110] mogą znacznie wpływać na rozkład naprężeń i wytrzymałość połączeń klejowych.

Nie prowadzono szczególnych badań dotyczących ingerencji w geometrię brzegów klejonych elementów w zakładkowych połączeniach klejowych. W połączeniach klejowych zakładkowych, na skutek nie osiowego przyłożenia sił występują obok naprężeń stycznych

dotatkowe naprężenia rozciągające, skierowane prostopadle do warstwy kleju. Naprężenia te mogą znacznie obniżyć nośność konstrukcyjną połączenia [65]. Rozwiązaniem problemu może być zastosowanie zmian w geometrii na brzegach zakładek połączenia klejowego przenoszących część obciążenia, dzięki czemu możliwe jest zmniejszenie szkodliwych naprężeń odrywających (normalnych).

Połączenia takie charakteryzują się większą wytrzymałością statyczną i dynamiczną, zwłaszcza w warunkach nierównomiernego odrywania. Zapewniają większą niezawodność i żywotność podczas długotrwałej eksploatacji. Jest to rezultatem rozdzielenia naprężeń pomiędzy otworami i warstwą kleju oraz zmniejszeniem koncentracji naprężeń wokół otworów. Dodatkowa warstwa kleju znajdująca się pomiędzy łączonymi elementami wypełnia szczeliny otworowe połączenia.

### **1.3 Wytrzymałość oraz trwałość zmęczeniowa konstrukcyjnych połączeń klejowych**

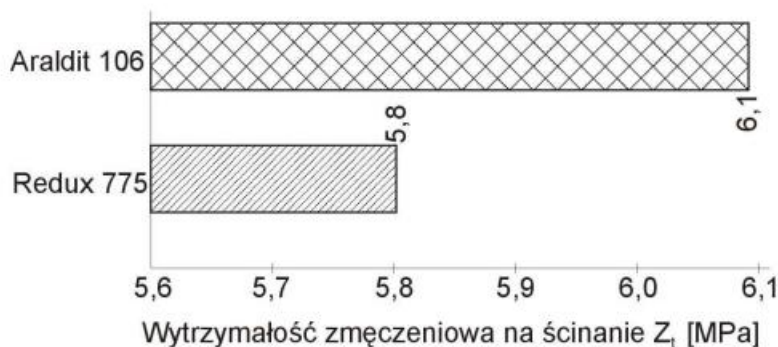
W spoinach połączeń klejowych dochodzi do procesu zmęczenia pod wpływem zmiennych naprężeń. Proces zmęczenia powoduje zmniejszenie wytrzymałości i trwałości połączenia klejowego skutkujące nagłym zniszczeniem złącza przy obciążeniach maksymalnych o wartości dużo niższej niż wytrzymałość statyczna tego połączenia. Zagadnienie trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych jest obiektem badań doświadczalnych i rozważań teoretycznych [72,77]. Właściwości zmęczeniowe połączeń klejowych jest trudno poddać jednoznacznej ocenie z uzyskanych wyników badań oraz mechanizmu zniszczenia zmęczeniowego złącza. Zagadnieniom wytrzymałości zmęczeniowej połączeń klejowych poświęcono stosunkowo niewiele publikacji, z których można stwierdzić wysoką trwałość zmęczeniową złącza znacznie mniejszą od ich wytrzymałości doraźnej.

#### **1.3.1 Wybrane metody badań wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych**

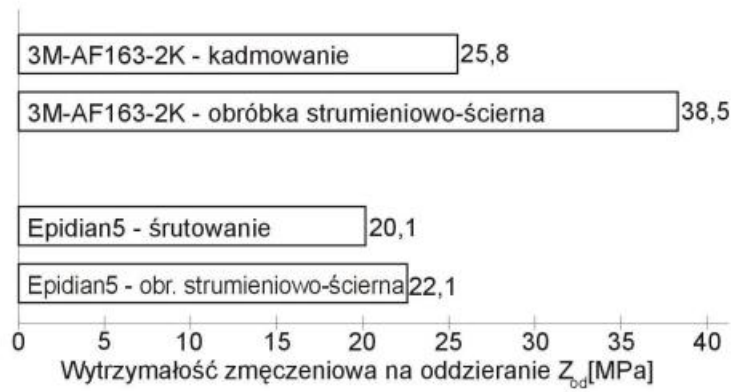
Pod wpływem zmiennych naprężeń w spoinach klejowych przebiega proces nazywany zmęczeniem. Jest to zmniejszenie wytrzymałości i trwałości połączenia klejowego, którego wynikiem jest zniszczenie. Zniszczenie zmęczeniowe występuje nagle, przy

naprężeniach o wartościach o wiele niższych od wytrzymałości statycznej połączenia. Zagadnieniom wytrzymałości zmęczeniowej połączeń klejowych poświęcono stosunkowo niewiele publikacji. Z prac [73-75] wynika, że klejone powierzchnie charakteryzuje wysoka trwałość zmęczeniowa, jeśli spoiny nie są nadmiernie obciążone.

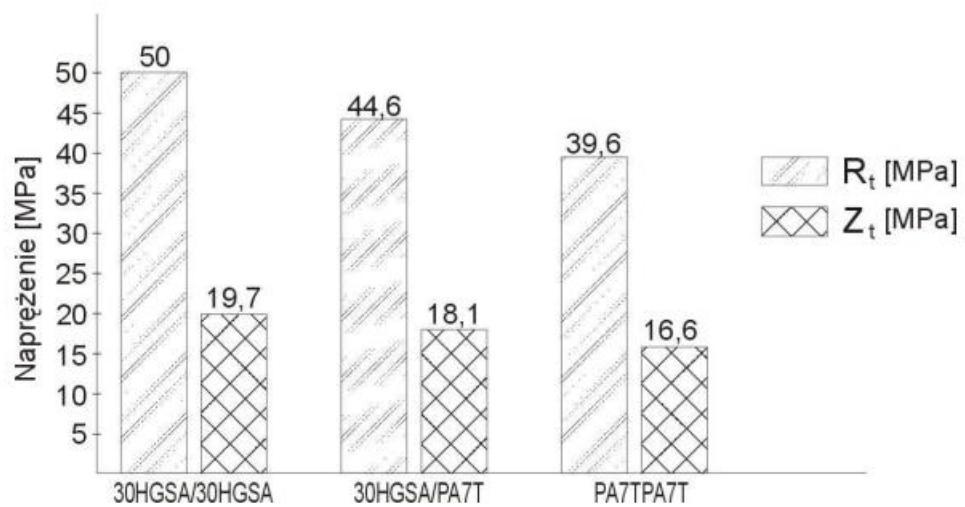
Z badań dotyczących wytrzymałości zmęczeniowej różnych typów połączeń klejowych [77, 80] wynika jednak, że wytrzymałość zmęczeniowa połączeń klejowych jest znacznie mniejsza od ich wytrzymałości doraźnej. Dlatego według normy PN-EN ISO 9664 zalecane jest przyjmowanie wartości średniego naprężenia cyklu na poziomie 0,35 wartości wytrzymałości doraźnej. W opracowaniu Godzimirski, Kozakiewicz, Łunarski, Zielecki [43] poświęconym analizie problematyki wytrzymałości zmęczeniowej połączeń klejowych wynika, że nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa takich połączeń może wynosić 0,15...0,5 ich wytrzymałości doraźnej i zależy ona wówczas od właściwości mechanicznych kleju (rys. 1. 38), sposobu przygotowania powierzchni łączonych elementów do klejenia (rys. 1.39), rodzaju klejonych materiałów (rys. 1. 40), oraz grubości spoiny. Ponadto wypływki kleju na krawędziach spoin zwiększają ich wytrzymałość zmęczeniową (rys. 1. 41).



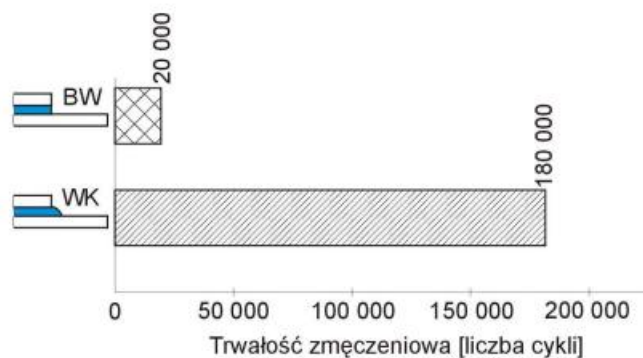
Rys. 1. 38. Porównanie wytrzymałości zmęczeniowej na ścinanie próbek zakładkowego połączenia klejowego ze stopu aluminium [76]



Rys. 1. 39. Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość zmęczeniową na oddzieranie  $Z_{0d}$  kompozycji klejowych [77]



Rys. 1. 40. Porównanie statycznej  $R_t$  i zmęczeniowej  $Z_t$  wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych wykonanych ze stali 30HGSA i stopu aluminium PA7T4, sklejonych klejem ME1 [81]



Rys. 1. 41. Porównanie trwałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejowych ze stopu aluminium, BW – bez wypełwki, WK – z wypełwką [81,82]

Jak wynika z powyższych przywołanych analiz, przewidywanie wytrzymałości zmęczeniowej połączeń klejowych jest zagadnieniem skomplikowanym, wymagającym przeprowadzenia czasochłonnych badań eksperymentalnych. Właśnie przez wzgląd na wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych, najistotniejszym zagadnieniem omawianym w dalszych rozdziałach niniejszej pracy będą badania wytrzymałości zmęczeniowej.

### 1.3.2 Czynniki mające wpływ na trwałość zmęczeniową połączeń klejowych

Właściwości zmęczeniowe tworzyw wielkocząsteczkowych w tym również spoin połączeń klejowych mogą być charakteryzowane następująco:

- $N$  trwałość zmęczeniowa, inaczej żywotność połączenia, czyli liczba cykli naprężeń, którą przeniesie połączenie klejowe dla danego cyklu naprężeń do chwili jego zniszczenia;
- $Z$  wytrzymałość zmęczeniowa, czyli największe natężenie cykliczne dla danego cyklu naprężeń, przy którym połączenie klejowe nie ulegnie zniszczeniu w ciągu liczby cykli równej podstawie próby zmęczeniowej;
- $P_z$  siły,  $M_z$  momenty, wartości obciążeń zmiennych działających na połączenie klejowe, mających charakter przebiegów ustalonych lub nieustalonych w czasie, powodujących zniszczenie po określonej liczbie cykli.

Iloraz wytrzymałości zmęczeniowej i wytrzymałości doraźnej połączenia klejowego będący wskaźnikiem zmęczenia charakteryzuje odporność spoin na obciążenie zmęczeniowe. Stosowane jest również określenie bezwzględnej trwałości zmęczeniowej, tj. trwałość wyznaczona dla cyklu obciążeniowego, którego maksymalna wartość jest określona liczbową wartością obciążenia. Ponadto, stosuje się także względną trwałość zmęczeniową, tj. trwałość wyznaczoną dla cyklu obciążeniowego, którego maksymalna wartość jest określona ułamkową wartością obciążenia niszczącego połączenie w próbie statycznej. Badania zmęczeniowe połączeń klejowych są w Polsce normatywnie ujednoczone i prowadzi się je zgodnie z normą PN-EN ISO 9664:2000 [84] dotyczącą badań własności zmęczeniowych połączeń klejowych. Norma wyróżnia pojęcia takie jak:  $\tau$  – naprężenie ścinające,  $\tau_R$  – statyczna wytrzymałość na ścinanie,  $\tau_{max}$  – naprężenie maksymalne,  $\tau_{min}$  – naprężenie minimalne,  $\tau_m$  – naprężenie średnie cyklu naprężeń,  $\tau_a$  – amplitudę cyklu naprężeń,  $T$  – okres cyklu naprężeń,  $R_t$  – współczynnik

asymetrii cyklu. Parametry cyklu obciążeniowego są ze sobą związane następującymi zależnościami:

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} \quad (1.44)$$

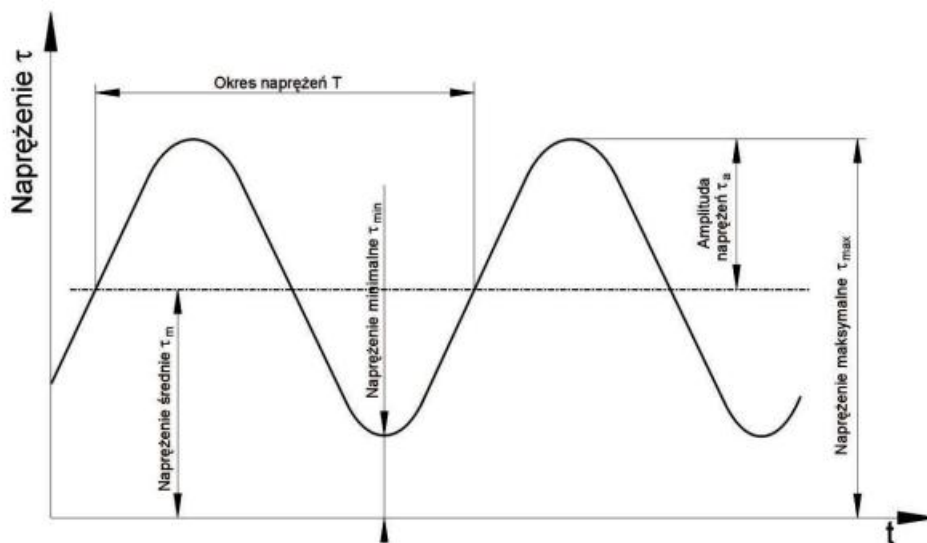
$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} \quad (1.45)$$

$$R_t = \frac{\tau_{max}}{\tau_{min}} \quad (1.46)$$

Zgodnie z normą [84] maszyna wytrzymałościowa do prób powinna umożliwiać otrzymywanie cyklicznego sinusoidalnie zmiennego obciążenia, w taki sposób, żeby jego maksymalna wartość znajdowała się pomiędzy 10% a 80% zakresu skali pomiarowej. Maszyna powinna być wyposażona w samocentrujący przyrząd do mocowania próbki. Częstotliwość zmian obciążenia jak jest zalecana powinna wynosić 30 Hz. Natomiast maksymalna częstotliwość nie może być większa niż 60 Hz, ze względu na nadmierne nagrzewanie się złącza. Norma ustala kształt i sposób wykonania próbek do badań dla stali i stopów aluminium. Minimalna liczba próbek wynosi:

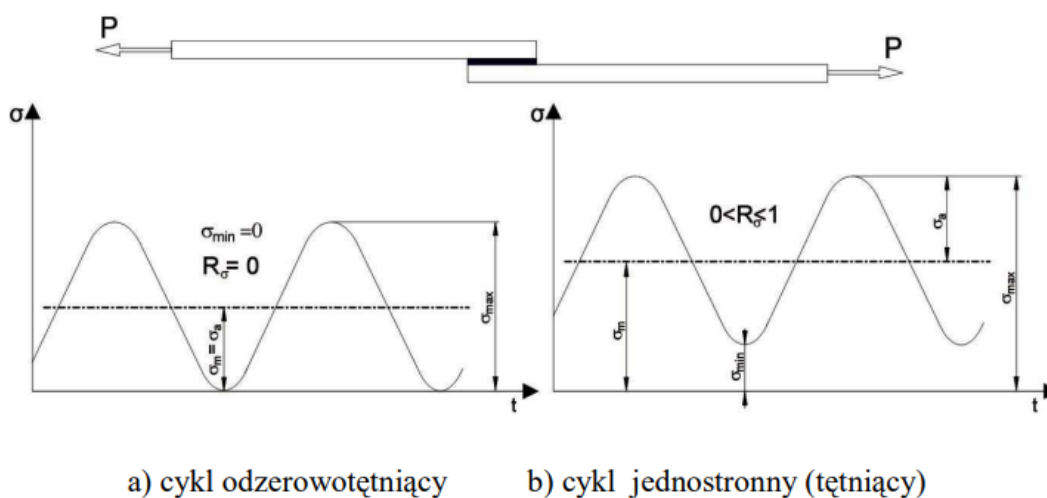
- co najmniej 4 próbki do badań zmęczeniowych,
- co najmniej 6 próbek do określenia wytrzymałości statycznej  $\tau_R$ .

Próbki powinny być przechowywane i poddawane badaniom w temperaturze  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  przy wilgotności względnej  $50 \pm 5\%$ . Norma zaleca, aby badania zmęczeniowe połączeń klejowych były realizowane przy sinusoidalnie zmiennym obciążeniu (rys. 1.42), dla którego średnie naprężenie cyklu  $\tau_m$  powinno wynosić  $0,25 \dots 0,5$  wytrzymałości statycznej  $\tau_R$  połączenia klejowego. Zwykle przyjmuje się  $\tau_m = 0,35 \tau_R$ .



Rys. 1. 42. Cykl naprężeń zmęczeniowych [84]

Najczęściej podczas przeprowadzania badań zmęczeniowych zakładkowych połączeń klejowych, badane elementy obciąża się cyklami regularnymi, tj. odzerowotętniacymi, jednostronnymi (rys. 1.43) oraz cyklem wahadłowym.

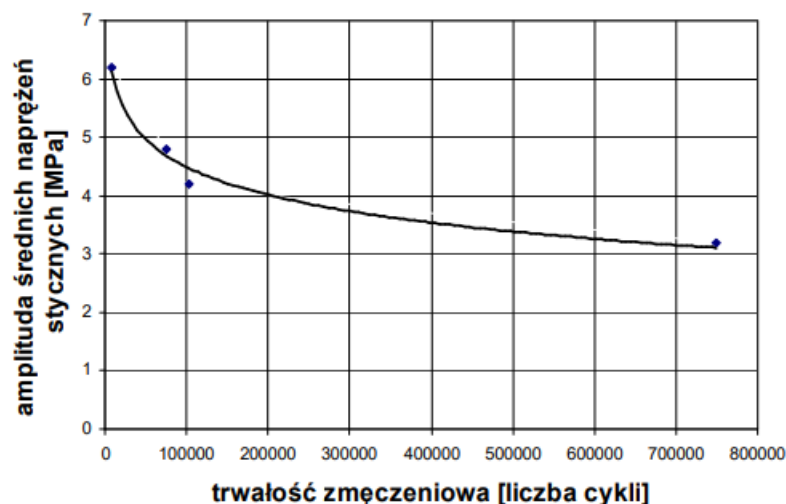


a) cykl odzerowotętniacy

b) cykl jednostronny (tętniacy)

Rys. 1. 43. Rodzaje obciążeń najczęściej stosowanych w badaniach zmęczeniowych zakładkowych połączeń klejowych na ścinanie [84]

Podobny charakter zmian obciążenia stosuje się podczas prób zmęczeniowych próbek czopowych walcowych. Wyniki badań zmęczeniowych są zwykle przedstawiane wykreslnie za pomocą wykresów zmęczeniowych Wöhlera, prezentujących zależność amplitudy naprężenia w funkcji liczny cykli N powodującej zniszczenie (rys. 1.44).



Rys. 1. 44. Zależność trwałości połączeń jednozakładkowych ze stopu aluminium, utwardzonych w czasie 1 h w temperaturze 60°C od amplitudy naprężeń

Wykres przedstawiony powyżej ma podobny charakter do wykresu zmęczeniowego metali, z tym, że krzywa wytrzymałości zmęczeniowej, np. dla stali dąży asymptotycznie do wartości, która wyznacza nieograniczoną wytrzymałość zmęczeniową. Połączenia klejowe nie wykazują tej cechy i ich wytrzymałość zmniejsza się ze wzrostem liczby cykli  $n$ , chociaż dla  $N > 10^7$  spadek wytrzymałości jest nieznaczny.

### 1.3.3 Metody poprawy trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej połączeń klejowych

Problematyka wytrzymałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejowych jest bardziej skomplikowana w porównaniu z problematyką wytrzymałości zmęczeniowej tworzyw metalicznych. Spowodowane jest to różnorodnością klejów konstrukcyjnych pod względem ich składu chemicznego, struktury, właściwości mechanicznych i fizycznych. Dodatkowo niebagatelny wpływ mają także możliwości kohezyjnego lub adhezyjnego zniszczenia spoin klejowych oraz złożonego stanu naprężenia w spoinach.

Z analiz wykonanych przez autorów opracowania [113] trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych zależy od grubości spoiny. Połączenia klejowe, których grubość kleju jest większa niż 0,2 mm charakteryzuje większa trwałość zmęczeniowa w porównaniu z cieńszymi, rzędu 0,03 mm. Przyczyną tego są większe wartości naprężeń w spoinach o mniejszej grubości. Kolejnym zjawiskiem przyczyniającym się do poprawy wytrzymałości doraźnej i większej trwałości zmęczeniowej jest zastosowanie elementów o większej sztywności, czego dowiódł

w swoich badaniach Komorek [114]. Zaobserwował, iż jest to spowodowane mniejszymi wartościami naprężeń w spoinach łączących bardziej sztywne elementy. Na trwałość zmęczeniową mają także wpływ wartości sił adhezji. Wraz z ich wzrostem wzrasta bezwzględna trwałość zmęczeniowa połączenia, tj. wzrasta wartość obciążenia, przy którym połączenie przenosi określoną liczbę cykli, natomiast spada względna trwałość zmęczeniowa, czyli spada wartość obciążenia odniesionego do wytrzymałości doraźnej połączenia. Podnoszenie wytrzymałości adhezyjnej połączeń klejowych jest korzystne z uwzględnieniem, że połączenia o większej wytrzymałości, wynikającej z odpowiednio przygotowanej powierzchni klejenia mogą być obciążone zmęczeniowo mniejszymi wartościami sił. Do uzyskania zadowalających wyników trwałości zmęczeniowej niewątpliwie przyczynia się sama substancja klejowa. Odpowiednio dobrany klej wykazuje lepszą trwałość zmęczeniową dla danego złącza. Wyższa względna trwałość zmęczeniowa substancji klejowych zależy od ich mniejszej skłonności do pełzania w temperaturze otoczenia.

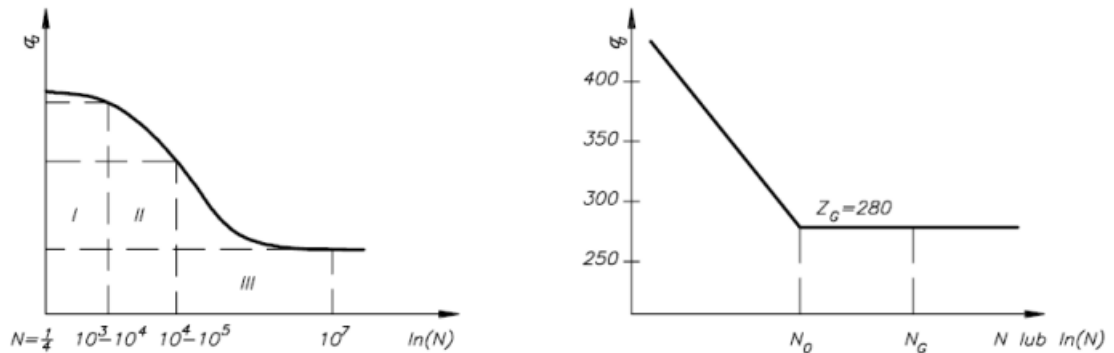
## **1.4 Wytrzymałość dynamiczna konstrukcyjnych połączeń klejowych**

Obciążenia dynamiczne to zmienne siły działające na konstrukcję, które przynoszą ze sobą szereg wyzwań dla inżynierów i projektantów. Mają one swoje źródła w wielu naturalnych i sztucznych zjawiskach, takich jak wiatr, fale, trzęsienia, ruchy maszyn, czy ruchy pojazdów. Wiatr, na przykład, może generować obciążenia dynamiczne na konstrukcjach, budynkach czy turbinach wiatrowych, które są szczególnie narażone na jego wpływ. Fale morskie mogą oddziaływać na konstrukcje offshore, takie jak platformy wiertnicze czy farmy wiatrowe.

Również w przemyśle spotykamy się z obciążeniami dynamicznymi. Ruchy maszyn i urządzeń mogą generować siły, które oddziałują na konstrukcje, na przykład podłogi czy fundamenty hal produkcyjnych. Ruchy pojazdów, szczególnie na mostach i wiaduktach, są kolejnym źródłem obciążeń dynamicznych.

Właściwe zrozumienie i przewidywanie, jak konstrukcja zareaguje na te siły, jest kluczowe dla zapewnienia jej bezpieczeństwa i trwałości. Projektant powinien być w stanie przewidzieć, jak konstrukcja zareaguje na te obciążenia, jakie naprężenia wystąpią w jej elementach, jakie mogą być deformacje i czy wszystko to będzie w granicach dopuszczalnej wytrzymałości konstrukcji.

W tym miejscu z pomocą przychodzi analiza MES, czyli metoda elementów skończonych. Za jej pomocą inżynierowie mogą symulować oddziaływanie tych obciążeń na konstrukcję, obliczyć naprężenia i deformacje, a następnie dokonać oceny wytrzymałości. Umożliwia to przewidywanie zachowania konstrukcji w rzeczywistych warunkach eksploatacji, co pozwala na zaprojektowanie konstrukcji bezpiecznej, wytrzymałej i zdolnej do przetrwania w obliczu różnych rodzajów obciążeń dynamicznych.



Rys. 1. 45

Krzywa Wöhlera, pełny (po lewej) i uproszczony (po prawej) wykres z zaznaczonymi zakresami wytrzymałości zmęczeniowej [101]

Konstrukcje klejone poddawane są obciążeniom dynamicznym (cyklicznym), należy rozważyć odporność zmęczeniową złącza. W dokładnych badaniach laboratoryjnych, uzyskano krzywą Wöhlera (rys. 1. 45) dostarczającą dane do obliczeń dla przeprowadzania takiego typu analiz. W wielu zastosowaniach obciążenie w złączu ma charakter dynamiczny, na przykład przyłożona siła ulega zmianom tworząc w złączu obciążenie zmienne. Może ono działać w kierunku osiowym bądź obwodowo. W wielu laboratoriach zajmujących się badaniami klejów i ich udoskonalaniem przeprowadza się badania zmęczenia dynamicznego połączeń klejowych uzyskując krzywe S/N (Wöhlera) oraz granice zmęczeniowe.

Badania te skupiają się głównie na obciążeniu skręcającym, ponieważ jest ono najbardziej istotne w dynamicznie pracujących złączach pasowanych. Na ich podstawie opracowano współczynniki korekcyjne umożliwiające obliczanie dynamicznej wytrzymałości zmęczeniowej w oparciu o obliczoną dla danego złącza wytrzymałość statyczną.

## 1.5 Zastosowanie Metody Elementów Skończonych (MES) do opisu zjawisk zachodzących w obciążonych połączeniach klejowych

Analityczne metody określania naprężeń w spoinach klejowych obarczone są błędami wynikającymi z przyjmowanych założeń upraszczających. Należą do nich m.in.: występowania w spoinie tylko jednego rodzaju naprężeń, stycznych lub normalnych, liniowej sprężystości klejów, linowej sprężystości elementów klejowych oraz stałości naprężeń wzdłuż grubości spoiny. Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania w celu lepszego rozpoznania zjawisk występujących w zakładkowych połączeniach klejowych w różnych przypadkach zmienionej geometrii strefy przykrawędziowej zrealizowano serię obliczeń, wykorzystując do tego celu dedykowane narzędzia obliczeniowe. Weryfikację takich zależności analitycznych przeprowadzić można metodą elementów skończonych MES [95,96,97,98,99]

Metoda ta nie daje możliwości uzyskania ogólnych zależności, ale pozwala obliczać konkretne przykłady, pod warunkiem, że dobrze znane są właściwości mechaniczne materiałów połączenia klejowego, poprawnie przyjęta jest siatka elementów skończonych oraz poprawnie zadane jest obciążenie i warunki brzegowe.

W obliczeniach MES założenia dla liniowej sprężystości klejów oraz elementów klejowych pozwala zweryfikować niedokładność zależności analitycznych wynikających z braku uwzględnienia złożonego stanu naprężeń w spoinach klejowych oraz z możliwości zmiany ich wartości wzdłuż grubości spoiny. W tego typu obliczeniach przejmuję się najczęściej płaski lub osiowosymetryczny stan naprężeń. Jest to zgodne z kształtem i sposobem obciążania modelowanych połączeń klejowych dla których wprowadza się zwykle zależności analityczne. W opracowaniu Godzimirskiego oraz Kotlarza [98], przeprowadzone badania numeryczne wykazały, że założenie występowania w zakładkowym połączeniu klejowym obciążonym na ścinanie płaskiego stanu naprężeń jest obarczone błędem mniejszym od 10%. Jednakże bardzo ważną zaletą stosowania badań numerycznych jest łatwość zastosowania hipotezy maksymalnych naprężeń normalnych dodatnich do określania stopnia wyęźnienia spoin klejowych. Stosując podaną hipotezę przy trójosiowym stanie naprężenia wymaga rozwiązania równania (1.47) skalarnego trzeciego stopnia [100]:

$$\begin{aligned} \sigma^3 - \sigma^3(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + \sigma(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2) - \\ (\sigma_x\sigma_y\sigma_z - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2 + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx}) = 0 \end{aligned} \quad (1.47)$$

Założenie płaskiego stanu naprężeń upraszcza równanie (1.47) do równania kwadratowego o następującej postaci (1.48):

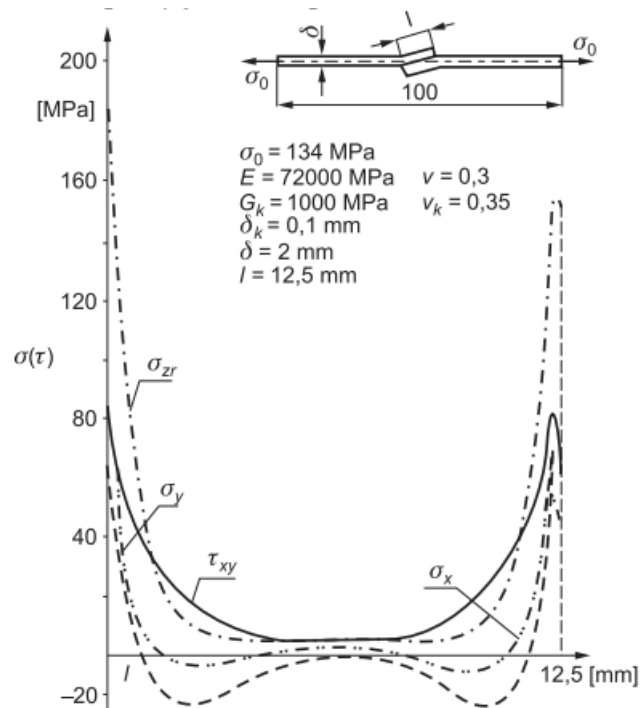
$$\sigma^2 - \sigma(\sigma_x + \sigma_y) + \sigma_x\sigma_y - \tau_{xy}^2 = 0 \quad (1.48)$$

Które ma dwa, łatwo dające się wyliczyć pierwiastki:

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (1.49)$$

Pierwiastek o większej wartości opisuje stopień wyężenia materiału spoiny klejowej znajdującej się w płaskim stanie naprężenia. Przy osiowosymetrycznym stanie naprężenia stopień wyężenia materiału spoiny klejowej określa to z trzech naprężeń normalnych, które ma największą wartość dodatnią.

Badania metodą elementów skończonych [30] wykazują, że w połączeniach zakładkowych obciążonych na ścinanie, których spoiny modeluje się dwiema warstwami elementów, występuje istotna zmiana wartości naprężeń wzdłuż grubości spoiny klejowej. Wyznaczono rozkład naprężeń w spoinie połączenia klejowego próbki wykonanej i obciążonej na ścianie zgodnie z PN-69/C-89300 (rys. 1.46), której spoinę zamodelowano dwiema warstwami. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że w spoinie takiego połączenia występuje złożony stan naprężenia, a wartość maksymalnych naprężeń normalnych przewyższa wartość maksymalnych naprężeń stycznych. Ponadto, wartość maksymalnych naprężeń zredukowanych, obliczonych na podstawie hipotezy maksymalnych naprężeń normalnych, ponad dwukrotnie przewyższa wartość maksymalnych naprężeń stycznych. Badania wykazały, że różnica wyężenia spoiny wzdłuż jej grubości wynosi 25%.



Rys. 1. 46 Rozkład naprężeń w górnej warstwie spoiny klejowej próbki zakładkowej wyznaczonej MES [95]

Badania numeryczne prowadzone przy pomocy metody elementów skończonych wykazują, że żadna z analitycznych metod nie umożliwi dostatecznie dokładnego określenia rozkładów naprężeń w spoinach klejowych połączeń zakładkowych obciążonych na ścianie. W obliczeniach numerycznych siatki elementów buduje się w taki sposób, aby uzyskać ich zagęszczenie w miejscach, które są najbardziej interesujące ze względu na stopień wyężenia materiału. W połączeniach klejowych takimi miejscami są spoiny klejowe, a zwłaszcza strefy przykrawędziowe.

Metoda elementów skończonych – MES (ang. FEA – Finite Element Analysis) jest w dniu dzisiejszym jedną z podstawowych metod prowadzenia obliczeń inżynierskich wspomaganych komputerowo (ang. CAE – Computer Aided Engineering). Zasadniczą istotą MES jest sposób aproksymacji równań różniczkowych cząstkowych polegających na podziale obszaru obliczeniowego na małe podobszary o prostych kształtach, zwanymi elementami skończonymi. W procesie rozwiązywania problemu przy pomocy obliczeń metodą elementów skończonych można wyróżnić trzy moduły: - preprocesor – moduł umożliwiający opracowanie modelu geometrycznego, wprowadzenie parametrów symulacji, zdefiniowanie warunków brzegowych;

- solver – moduł umożliwiający wybór typu analizy, określenie warunków rozwiązania, określenie zakresu wyników do zapisania w pliku wynikowym;

- postprocessor – moduł umożliwiający prowadzenie obserwacji, analizy i opracowania rezultatów, przygotowania raportu z analizy.

Jedną z ważnych zalet MES jest możliwość przeprowadzania symulacji bez konieczności budowania prototypu. Znacznie redukuje to czas i koszty procesu projektowania. Wirtualna symulacja przedmiotowych zjawisk fizycznych umożliwia śledzenie procesu na bieżąco, w trakcie badań, czego niestety badania eksperymentalne nie zapewniają. W przypadku badań empirycznych, zadając właściwe warunki brzegowe możemy zaobserwować efekt eksperymentu, natomiast w przypadku obliczeń z wykorzystaniem profesjonalnego oprogramowania do analizy elementów skończonych MES istnieje już możliwość śledzenia zjawisk zachodzących w każdym momencie trwania symulacji.

### **Podsumowanie**

Na podstawie przeglądu literatury oraz przeprowadzonych badań poświęconych zagadnieniu związanemu z nośnością jednozakładowych połączeń klejowych można uznać, że wielu naukowców bada ten problem. Na przestrzeni lat został zrealizowany szereg różnych badań poświęcony wpływowi czynników konstrukcyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych. W niniejszej pracy celem badań było przedstawienie rozwiązania polegającego na wykonaniu modyfikacji konstrukcyjnych, które finalnie wpływają na nośność jednozakładowych połączeń klejowych. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych w ramach, których zbadano wpływ nacięć i otworów wykonanych na czołowych krawędziach łączonych elementów na właściwości statyczne i zmęczeniowe jednozakładowych połączeń klejowych. Oryginalność pracy polega na badaniach zmęczeniowych zastosowanych złączy poddawanych różnym modyfikacjom konstrukcyjnym w strefie przykrawędziowej zakładki w celu wykazania istotnej poprawy ich trwałości zmęczeniowej. Można zatem stwierdzić, że opisane metody są skuteczne w przypadku poprawy wytrzymałości dla jednozakładowych połączeń klejowych. Dodatkowo prostota wykonania przedstawionych modyfikacji geometrii elementu na czołowej krawędzi zakładki może potencjalnie zostać wykorzystana w rzeczywistych zastosowaniach dla projektowania konstrukcyjnego. Ponadto, w kontekście efektu cieplarnianego i wymagań dotyczących redukcji CO<sub>2</sub> istnieje zapotrzebowanie na lekkie rozwiązania konstrukcyjne, które zmniejszą zużycie energii. Tym samym istotne są wszelkie rozwiązania, które poprawią właściwości mechaniczne konstrukcji bez zwiększania ich masy. W niniejszej pracy wykazano,

że zastosowanie prostych modyfikacji może znacząco poprawić trwałość zmęczeniową połączeń klejowych elementów wykonanych ze stali oraz ze stopu aluminium. Badania wykazały wpływ wydłużenia czasu szczególnie w obszarze zmęczenia niskocyklowego. Skutki rozważanych w tym opracowaniu modyfikacji konstrukcyjnych polegających na wykonaniu wcięć i otworów na krawędzi złączy, mogą znaleźć swoje zastosowanie przy projektowaniu i budowie różnego typu konstrukcji cienkościennych obciążonych cyklicznie w czasie eksploatacji.

## 2. Cel, hipoteza i zakres pracy

W pierwszej kolejności, od strony literatury metodologicznej należy wskazać, czym jest cel, hipoteza, zakres pracy. Cel pracy to zdefiniowany, konkretny zamiar, do którego dąży autor pracy. Cel pracy powinien być możliwy do osiągnięcia, mierzalny, istotny [66]. Hipoteza pracy to twierdzenie, które jest formułowane na podstawie obecnej wiedzy i które ma być sprawdzone przez badanie. Hipoteza powinna być precyzyjna i testowalna [68].

Celem głównym pracy jest analiza wpływu modyfikacji konstrukcyjnych złącza powodujących zmianę rozkładu naprężeń na właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych. Zagadnienia podejmowane w niniejszej pracy dotyczą badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych (MES) możliwości podwyższenia wytrzymałości połączeń adhezyjnych. Działania mające na celu poprawę właściwości połączeń klejowych zakładają wprowadzenie modyfikacji geometrii strefy przykrawędziowej elementów klejonych. Tym samym, cel główny pracy może być zdefiniowany jako „dobór geometrii przykrawędziowej części połączeń klejowych w celu zapewnienia efektywnego przyrostu właściwości wytrzymałościowych zarówno statycznych, jak i zmęczeniowych”. Zagadnienie dotyczy konstrukcyjnych połączeń klejowych blach z różnych stopów metali stosowanych w budowie maszyn.

Zamierzeniem autora pracy jest dobór geometrii przykrawędziowej części połączeń klejowych, która zapewniłaby efektywny przyrost właściwości wytrzymałościowych zarówno statycznych, jak i zmęczeniowych. Istotnym zagadnieniem, które zostało podjęte w ramach realizacji prac badawczych są również względy technologiczne dotyczące przygotowania elementów klejonych. Jednym z celów dodatkowych pracy jest budowa efektywnego modelu numerycznego konstrukcyjnych połączeń klejowych, zweryfikowanego na podstawie wyników badań eksperymentalnych.

Hipoteza badawcza pracy opiera się na stwierdzeniu, iż istnieje możliwość zwiększenia nośności oraz trwałości zmęczeniowej zakładkowego połączenia klejowego elementów z konstrukcyjnych stopów metali poprzez zmodyfikowanie geometrii złącza w strefie przykrawędziowej zakładki. W ramach tej hipotezy autor dodatkowo zweryfikuje, czy lokalne zwiększenie grubości kleju w czołowej części połączenia klejowego poprawi jego wytrzymałość poprzez redukcję i bardziej równomierny rozkład naprężeń w złączu.

Do zrealizowania celu pracy naukowej oraz sprawdzenia hipotezy badawczej potrzebna jest adekwatna metodologia. Wyniki badań zrealizowanych w pracy oraz wnioski z nich płynące w założeniu mają posłużyć, jako zbiór wytycznych do projektowania konstrukcji klejonych. W kontekście omawianej pracy, metodologia ta obejmuje kilka kluczowych etapów, które mogą zostać skonkretyzowane, w następujący sposób:

- Przygotowanie próbek połączeń klejowych

Pierwszym etapem prac badawczych będzie przygotowanie próbek połączeń klejowych. Na tym etapie, materiały (blachy ze stali i stopów aluminium) będą odpowiednio przygotowane do klejenia. Badania wykonane zostały dla blach z powszechnie stosowanych w przemyśle metali, tj. wybranych gatunków stali oraz stopów aluminium. Na podstawie przeglądu literatury dostrzeżono, że lokalne zwiększenie grubości kleju w czołowej części połączenia może przyczynić się do poprawy jego wytrzymałości. Dzieje się tak ze względu na spiętrzenie naprężeń przy krawędzi połączeń klejowych, a lokalne zwiększenie grubości warstwy kleju wpływa na redukcję i bardziej równomierny rozkład naprężeń w złączu. W związku z tym rozważono różną geometrię czołowej części połączenia taką jak nacięcia i otwory o różnych wymiarach. Oprócz redukcji naprężeń wprowadzone zmiany miały na celu lokalne zwiększenie efektywnej powierzchni złącza, co w rezultacie także skutkuje zwiększeniem jego nośności. Innymi słowy, geometria czołowej części połączenia zostanie skonstruowana w taki sposób, aby zwiększyć lokalną grubość kleju.

- Analiza powierzchni klejonych

Przed przystąpieniem do klejenia, powierzchnie do łączenia zostaną poddane analizie chropowatości oraz swobodnej energii powierzchniowej. Ta analiza ma na celu zapewnienie, że powierzchnie są odpowiednio przygotowane do klejenia.

- Przygotowanie połączeń klejowych

Na tym etapie, połączenia klejowe zostaną wykonane z użyciem chemoutwardzalnego kleju epoksydowego.

- Badanie połączeń

Wykonane połączenia zostaną poddane badaniom zmęczeniowym. Następnie zostaną przeprowadzone badania porównawcze wytrzymałości statycznej połączeń w warunkach ścinania.

- Analiza wyników

Wyniki badań zostaną analizowane, a powierzchnie przełomów klejowych zostaną poddane analizie fraktograficznej z użyciem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM).

- Modelowanie numeryczne

Po przeprowadzeniu badań jako kolejny i istotny etap badań własnych, zostanie stworzony model numeryczny MES połączeń klejowych, który zostanie zweryfikowany na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Model zostanie opracowany w programie NX Simcenter, który dysponuje specjalnymi elementami typu kontakt „cohesive” dedykowanymi do modelowania m.in. złączy adhezyjnych. Model MES zostanie poddany walidacji celem zapewnienia wiarygodnej zbieżności z wynikami badań eksperymentalnych. W ramach analiz numerycznych zostaną też precyzyjnie określone rozkłady naprężeń w spoinie klejowej dla różnych wariantów geometrii strefy przykrawędziowej złącza. To przyczyni się do doboru odpowiedniego kształtu czołowej części elementów klejonych, która zapewni efektywne podwyższenie nośności. W założeniu wybór geometrii czoła złącza będzie miał uwzględniać względy ekonomiczne związane z technologią wykonania.

Wykorzystywane w badaniach własnych metody, takie jak skaningowa mikroskopia powierzchni klejonych, pozwalają na analizę i ocenianie jakości połączeń i wykrywanie ewentualnych wad, takich jak pęcherze powietrza czy nieprawidłowe dystrybucje kleju. Badania wytrzymałościowe, takie jak testy ścinania, dostarczają z kolei wartościowych danych na temat właściwości wytrzymałościowych połączenia. Analiza fraktograficzna jest zaś kolejnym istotnym narzędziem do oceny jakości i trwałości połączeń klejowych.

W zakresie wykorzystania modelowania komputerowego, należy dopowiedzieć, iż MES pozwala na symulację i analizę wpływu różnych czynników na właściwości połączeń klejowych. Programy takie jak NX Simcenter, z funkcją „cohesive”, pozwalają na szczegółowe modelowanie połączeń klejowych i analizę wpływu takich czynników jak geometria elementów klejonych czy warunki klejenia na nośność i trwałość połączenia. Geometria połączenia obejmuje rozmiar, kształt i rozmieszczenie obszarów klejenia. Na przykład, połączenia o większym obszarze klejenia zwykle mają większą wytrzymałość, a połączenia o nieregularnym kształcie mogą prowadzić do skoncentrowania naprężeń. Wykorzystanie symulacji numerycznych umożliwi również przewidywanie zachowania

połączeń klejowych w różnych warunkach obciążenia, co pozwala na zoptymalizowanie konstrukcji pod kątem wytrzymałości i trwałości.

Wyniki modelowania będą następnie analizowane i porównywane z wynikami badań eksperymentalnych. To porównanie pozwoli na ocenę dokładności modelu numerycznego i jego zdolności do przewidywania zachowań rzeczywistych. Na tej podstawie można będzie sformułować wnioski dotyczące optymalnych warunków dla procesu klejenia i konstrukcji połączeń klejowych, które mogą służyć jako podstawa dla dalszych badań i rozwoju technologii klejenia.

Powyższa metodologia badań pozwoli na osiągnięcie celu pracy oraz sprawdzenie postawionej hipotezy. Przeprowadzenie tak dogłębnej analizy połączeń klejowych może przyczynić się do optymalizacji procesów klejenia w przemyśle, co w konsekwencji przekłada się na poprawę jakości i trwałości produkowanych konstrukcji. W zależności od wyników, możliwe będzie wskazanie optymalnej geometrii strefy przykrawędziowej, technologii przygotowania powierzchni do klejenia, a także wyboru odpowiedniego kleju. Przygotowane w rezultacie przeprowadzonego procesu badawczego wytyczne powinny być dostosowane do konkretnych warunków i uwzględniać takie czynniki, jak rodzaj używanych materiałów, rodzaj obciążeń działających na konstrukcję czy warunki eksploatacji.

### 3. Analiza MES

Model numeryczny został opracowany w programie NX Simcenter, który jest zaawansowanym narzędziem do analizy metody elementów skończonych (MES). Program pozwala na modelowanie złożonych struktur i materiałów, uwzględniając ich nieliniową charakterystykę materiałową i nieliniowości geometryczne. Modelowanie stref kohezyjnych, umożliwiające dokładne odwzorowanie zachowania kleju, pozwoliło na pełne zrozumienie wpływu różnych czynników na wytrzymałość połączeń klejowych. Ponadto, wykorzystany program dysponuje technikami modelowania stref kohezyjnych, takie jak wprowadzanie spójnych elementów lub spójnych interakcji między powierzchniami w analizach metodą elementów skończonych.

Modelowanie numeryczne zakładkowego połączenia klejowego przeprowadzono dla wariantów połączenia klejowego z próbek o niezmienionej geometrii w strefie przykrawędziowej oraz połączeń klejowych z próbek o zmienionej geometrii zakładki przy otworach 2 mm i 3 mm.

Program SIMULINK umożliwił analizę modeli fizycznych uwzględniających nieliniową charakterystykę materiałową oraz nieliniowości geometryczne wywołane dużymi odkształceniami.

Model geometryczny płytek oraz warstwa kleju odpowiadały rzeczywistym wymiarom. Zgodnie z ideą tworzenia złożenia z poszczególnych elementów powstał model próbki odpowiadający rzeczywistej próbce. W modelu numerycznym zastosowano powiązania warstwy kleju w połączeniu zakładkowym z jednym i drugim elementem, jako model elementów kohezyjnych.

W rozdziale opisano obliczenia oparte na metodzie elementów skończonych, które obejmowały badania z wykorzystaniem modeli zakładkowego połączenia klejowego w różnych wariantach. Modyfikacja polegała na zmianie geometrii w strefie przykrawędziowej – zmieniono rozmieszczenie zastosowanych wcięć, odwzorowując przy tym warunki brzegowe z badań eksperymentalnych. Oceniono, jakie są różnice w wartościach naprężeń, jeżeli do obliczeń zostanie wykonana domyślna siatka tetragonalna i siatka bardziej regularna heksagonalna. Na podstawie otrzymanych wyników przeprowadzono analizy porównawcze w celu rozpoznania zmian naprężeń występujących w elementach połączenia.

Metoda elementów skończonych – MES (ang. FEA – Finite Element Analysis) jest w dniu dzisiejszym jedną z podstawowych metod prowadzenia obliczeń inżynierskich wspomaganych komputerowo (ang. CAE – Computer Aided Engineering). Zasadniczą istotą MES jest sposób aproksymacji równań różniczkowych cząstkowych polegających na podziale obszaru obliczeniowego na małe podobzary o prostych kształtach, zwanymi elementami skończonymi. W procesie rozwiązywania problemów przy pomocy obliczeń metodą elementów skończonych można wyróżnić trzy moduły:

- preprocesor - moduł umożliwiający opracowanie modelu geometrycznego, wprowadzenie parametrów symulacji, zdefiniowanie warunków brzegowych;
- solver - moduł umożliwiający wybór typu analizy, określenie warunków rozwiązania, określenie zakresu wyników do zapisania w pliku wynikowym;
- postprocesor - moduł umożliwiający prowadzenie obserwacji, analizy i opracowania rezultatów, przygotowania raportu z analizy.

Jedną z ważnych zalet MES jest możliwość przeprowadzania symulacji bez konieczności budowania prototypu. Znacznie redukuje to czas i koszty procesu projektowania. Wirtualna symulacja przedmiotowych zjawisk fizycznych umożliwia śledzenie procesu na bieżąco, w trakcie badań, czego niestety badania eksperymentalne nie zapewniają. W przypadku badań empirycznych, zadając właściwe warunki brzegowe możemy zaobserwować efekt eksperymentu, natomiast w przypadku obliczeń z wykorzystaniem solvera MES istnieje już możliwość śledzenia zjawisk zachodzących w każdym momencie trwania symulacji.

Na potrzeby realizacji zadania dla przedstawionego zagadnienia naukowego wykorzystano oprogramowanie NX Simcenter. Jest to jeden z dostępnych na rynku programów wykonujących obliczenia w metodzie elementów skończonych. NX Simcenter umożliwia analizowanie złożonych nieliniowych problemów z zakresu mechaniki ciała stałego i przepływów ciepła. W programie NX Simcenter można modelować połączenia klejowe specjalnie dedykowanym do tego „kontakt cohesive”. Kontakt cohesive jest wyspecjalizowanym zachowaniem kontaktowym, które łączy efekty interakcji kontaktowej i zachowania kohezyjnego między dwiema powierzchniami. Służy do modelowania interakcji między powierzchniami, które mogą doświadczać zarówno separacji, jak i adhezji podczas symulacji. Kontakt kohezyjny pozwala symulować scenariusze, w których interfejsy między materiałami mogą się rozdzielać, rozwarstwiać lub doświadczać sił adhezji, przy jednoczesnym uwzględnieniu mechanicznego zachowania tych interakcji. W kontakcie kohezyjnym interfejs

między stykającymi się powierzchniami można modelować za pomocą elementów kohezyjnych, które są elementami symulującymi zachowanie materiałów adhezyjnych. Te spójne elementy lub modele zachowania określają naprężenia wzdłuż interfejsu zmieniają się wraz z przemieszczeniem. Odkształcenia kohezyjne wpływają na siły i momenty kontaktowe między powierzchniami.

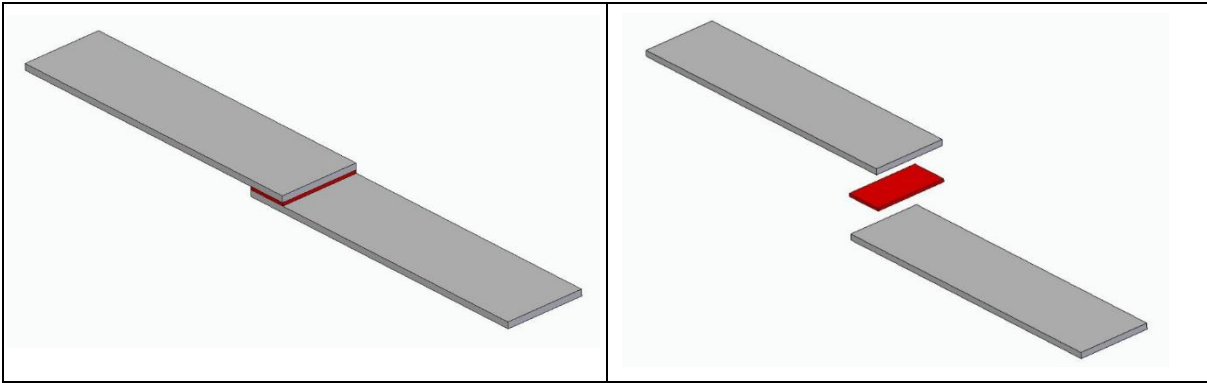
Proces przygotowania modelu oraz późniejszą realizację obliczeń można podzielić na kilka etapów:

- przygotowanie modelu geometrycznego (moduł design),
- wygenerowanie siatki elementów skończonych (moduł mesh),
- zdefiniowanie warunków brzegowych (moduł mechanical),
- rozwiązanie zadania,
- analiza otrzymanych wyników.

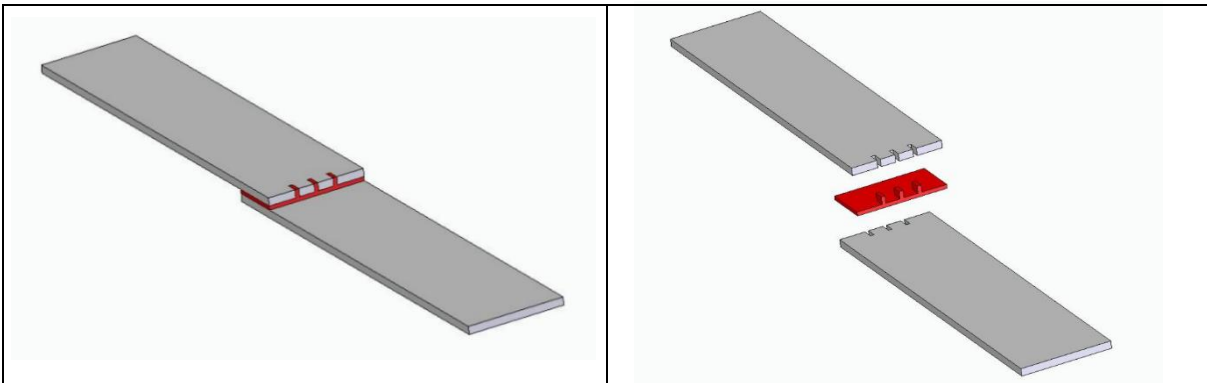
### **3.1 Modelowanie 3D połączenia klejowego**

Analizę MES przeprowadzono dla modelu połączenia jednozakładkowego, utworzonego z dwóch elementów o długości 100 mm, szerokości 25 mm oraz o grubości 2 mm. Długość zakładki połączenia była równa 12,5 mm, natomiast grubość spoiny klejowej wynosiła 0,1 mm. Spoinę klejową zamodelowano jako warstwę, osobny element.

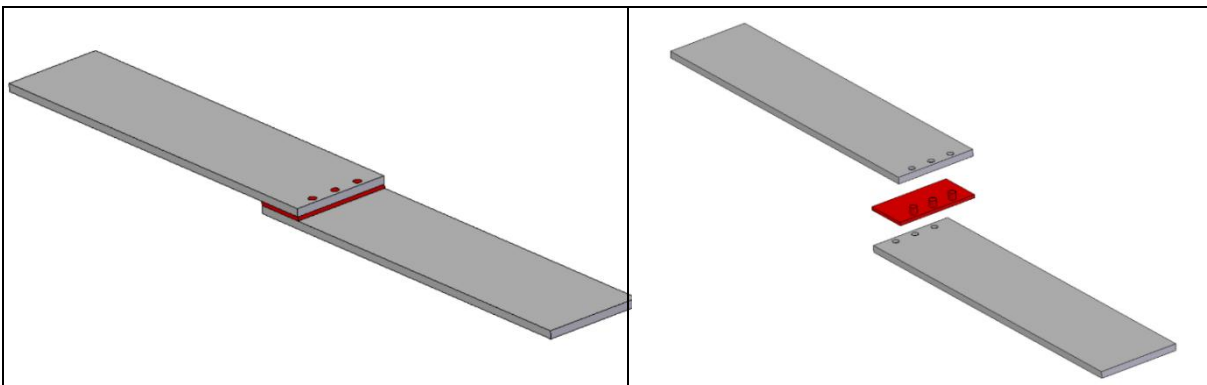
Do wykonania modeli bryłowych obiektów składowych symulacji użyto programu Solid Edge 2024. Zamodelowano jedną płytkę o wskazanych wyżej gabarytach, którą użyto dwukrotnie w modelu złożeniowym zakładkowego połączenia klejowego (rys. 3.1) wariantu bazowego. Model bez zmienionej geometrii w strefie przykrawędziowej. Wykonano również modele blach górnej i dolnej z wcięciami (rys. 3.2) o różnej geometrii oraz z otworami (rys. 3.3) Dla tych modeli ze zmienioną geometrią strefy przykrawędziowej zbudowano model warstwy kleju z dopasowanym kształtem dla wycięć i otworów na wzór większego odzwierciedlenia rzeczywistości podczas klejenia próbek.



Rys 3. 1. Model geometryczny jednozakładkowego połączenia klejowego opracowany na potrzeby analizy MES – wariant bazowy [opracowanie własne]



Rys 3. 2. Model geometryczny jednozakładkowego połączenia klejowego opracowany na potrzeby analizy MES – wariant z wcięciami [opracowanie własne]



Rys 3. 3. Model geometryczny jednozakładkowego połączenia klejowego opracowany na potrzeby analizy MES – wariant z otworami [opracowanie własne]

Wykonano złożenia zamodelowanych elementów dla badanych wariantów połączeń klejowych, dla wariantu bazowego, wariantu z wcięciami szerokimi, wariantu z wcięciami średnimi, wariantu z wcięciami wąskimi oraz dla wariantu z otworami. Tak wykonane złożenia dla poszczególnych wariantów jednozakładkowych połączeń klejowych zapisano w formacie 3D Parasolid dla dalszych etapów pracy w programie NX Simcenter.

### 3.2 Przygotowanie obiektu symulacji

Do symulacji i analiz metodą elementów skończonych (MES) użyto zintegrowanego środowiska NX Simcenter. Środowisko NX Simcenter łączy w sobie preprocesor do przygotowania danych do symulacji, solver służący do rozwiązywania przygotowanej macierzy danych, postprocesor do wizualizacji i prezentacji wyników analiz.

Przygotowanie obiektu symulacji składa się z etapów:

- definicja geometrii,
- definicja materiałów,
- definicja właściwości,
- definicja grup siatek,
- nakładanie siatek,
- definicja połączeń,
- definicja utwierdzeń lub ograniczeń stopni swobody (DOF),
- definicja obciążeń.

Jako geometrię wczytano poprzednio przygotowany plik z geometrią 3D w formacie Parasolid. Sesja w środowisku NX Simcenter składa się z dwóch plików: sim – zawierającego obiekty symulacji (połączenia, utwierdzenia, obciążenia), fem – zawierającego definicje materiałów, właściwości, siatki.

W zakresie zdefiniowania właściwości badanego materiału z których są stworzone elementy zakładkowego połączenia klejowego przyjęto następujące rozwiązania: łączonym elementom nadano nieliniowe właściwości stali oraz gatunek, natomiast tworzywu adhezyjnemu nadano nieliniowe właściwości kleju Araldite 2014-2. W tabelach 3.1 – 3.3 zamieszczono parametry materiałowe odpowiednich grup elementów wykorzystywanych w budowie badanych wersji połączeń klejowych. W pliku fem zdefiniowano materiały izotropowe dla poszczególnych materiałów.

Tab. 3. 1 Wprowadzone parametry materiałowe dla kleju

Moduł Young E	1200 MPa
Współczynnik Poisson $\nu$	0,33
Wytrzymałość na rozciąganie	38 MPa

Tab. 3. 2. Wprowadzone parametry materiałowe dla stali

Moduł Young E	210000 MPa
Współczynnik Poisson $\nu$	0,33
Wytrzymałość na rozciąganie	49 MPa

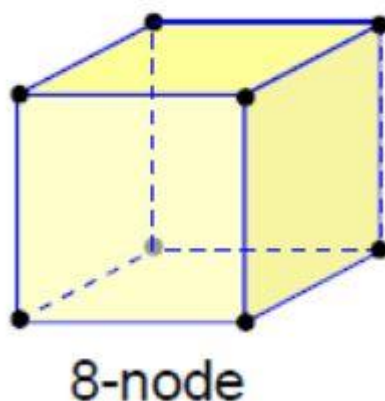
Tab. 3. 3. Wprowadzone parametry materiałowe dla stopu aluminium

Moduł Young E	73000 MPa
Współczynnik Poisson $\nu$	0,33
Wytrzymałość na rozciąganie	39 MPa

Minimalna ilość danych opisujących materiał to: rodzaj (izotropowy, anizotropowy, laminat itp.), moduł Younga, współczynnik Poissona.

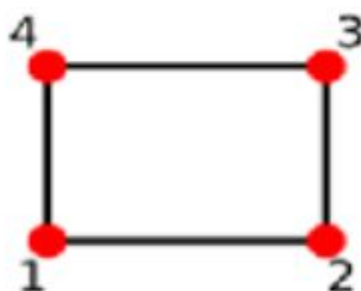
Utworzono właściwości fizyczne dla każdego składnika symulacji (blacha dolna, blacha górna, klej). Właściwości fizyczne definiują postać składnika symulacji i przypisany materiał. Postacią może być bryła (solid), element powłokowy o stałej grubości (shell), belka (beam), pręt (rod) i inne (laminaty, elementy elastyczne, elementy sprężyste). W rozpatrywanej symulacji wszystkie składniki mają postać bryły (solid) z przypisanym materiałem „aluminium” lub „stal” dla blach i „klej” dla bryły reprezentującej warstwę kleju.

Dla każdego elementu symulacji utworzono grupę siatek której przypisano właściwości fizyczne. Dla blach, z uwagi na ich prostą, prostopadłościenną konstrukcję przyjęto siatkę typu CHEXA(8).



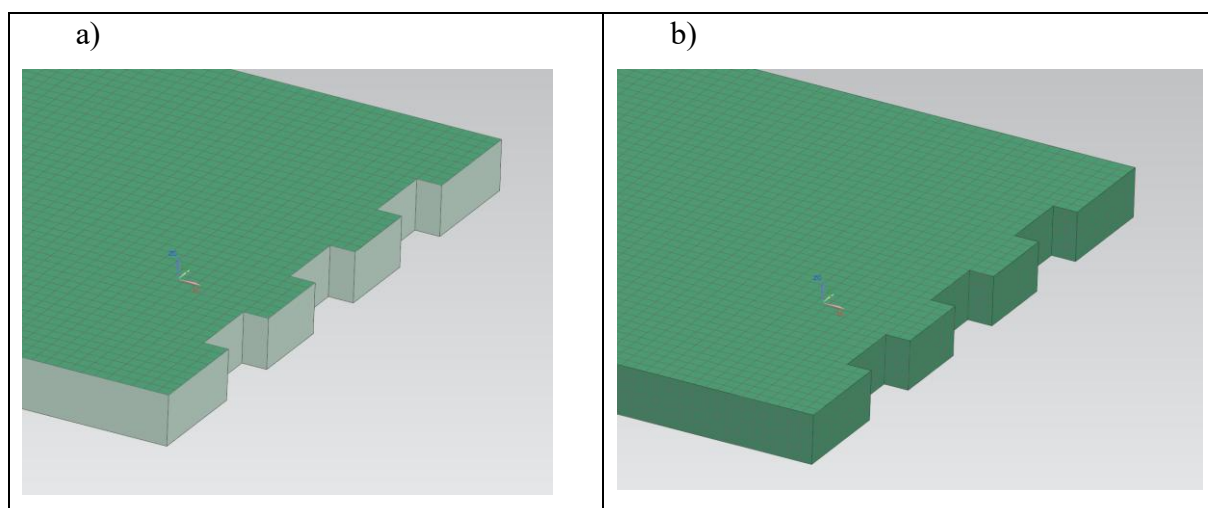
Rys 3. 4. Przykład elementu 8-węzłowej siatki CHEXA(8) [opracowanie własne]

Do utworzenia takiej siatki wykorzystano metodę wyciągania siatki 2D. Najpierw na powierzchnię blachy nałożono siatkę pomocniczą 2D typu CQUAD(4) o podziałce 0,5 mm.



Rys 3. 5. Przykład elementu 4-węzłowej siatki CQUAD(4) [opracowanie własne]

Dodatkowo, aby ocenić wpływ rodzaju siatki elementów skończonych wykorzystywanej w modelowaniu połączenia klejowego na otrzymane wyniki zrezygnowano z siatki automatycznej generowanej domyślnie przez program jako „automesh”. Obliczenia przeprowadzono dla siatki zagęszczonej utworzonej z siatki 2D wyciągniętej przez grubość blachy stosując podziałkę 0,5 mm. Na rysunku 3.6 przedstawiono modele do połączeń klejowych przygotowanych do badań wykorzystując siatkę z własnym doбором parametrów siatki, zdefiniowano podziałkę o wartości 0,5 mm. Siatka „automesh” jest domyślną siatką elementów skończonych oferowana użytkownikowi przez program MES. Zasadniczą zaletą tego typu siatki jest stosunkowo mały nakład pracy przy budowie modelu oraz optymalny czas obliczeń. Jest to stosunkowo dobre rozwiązanie dla użytkowników programu i jest przez nich często wykorzystywane [80,123].



Rys 3. 6. Fragment modelu blachy z wcięciami a) powierzchni siatki 2D b) siatka 3D typu CHEXA (8) [opracowanie własne]

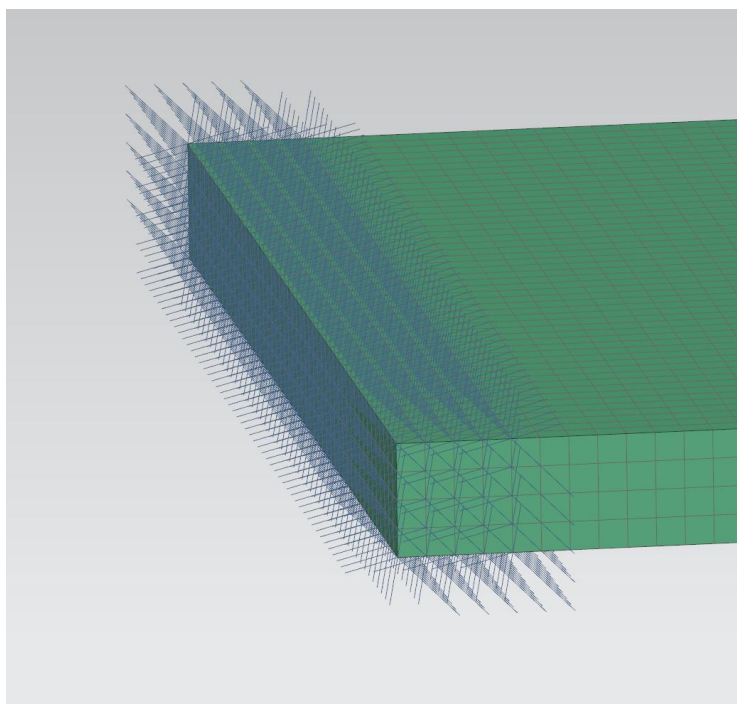
Siatka tego typu jest odpowiednia do elementów o kształtach nieregularnych. Domyślną wielkość elementu siatki wyliczoną na podstawie wielkości siatkowanej części podzieloną przez 5 w celu zagęszczenia siatki.

Opracowanie i zastosowanie drugiego rodzaju siatki jest bardziej pracochłonne. Ma ono jednak swoje zalety chociażby w przypadku regularnej budowy siatki, która korzystnie wpływa na jakość otrzymanych wyników.

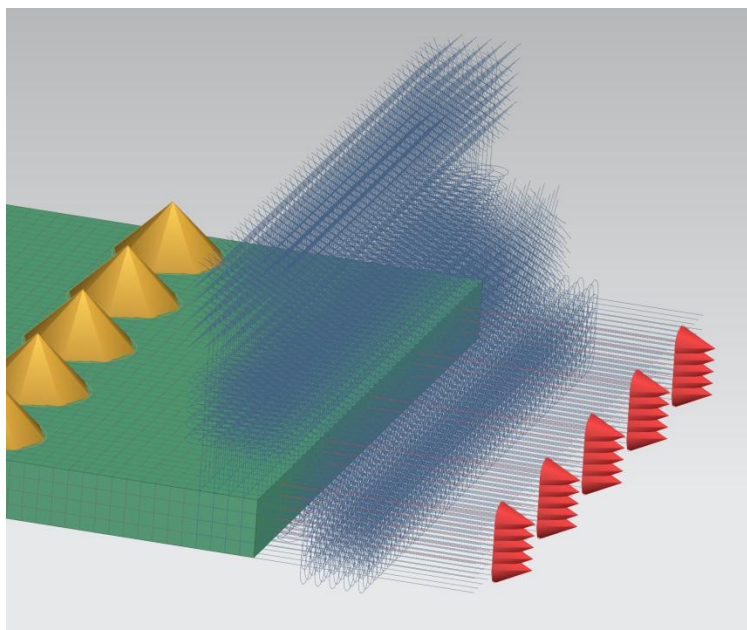
Zadano warunki brzegowe w zakresie obciążenia modelu połączenia zakładkowego na podstawie parametrów występujących w testach eksperymentalnych próbek mocowanych w maszynie wytrzymałościowej. Stąd w modelu zakładkowego połączenia klejowego zdefiniowano następujące warunki (rys. 3.7):

- w jednym z końców pierwszego elementu klejowego odebrano wszystkie stopnie swobody  $U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3 = 0$ , odtwarzając w ten sposób warunki mocowania połączenia w uchwycie maszyny wytrzymałościowej;

- dla drugiego końca drugiego elementu klejowego zamodelowano obciążenie w postaci siły działającej na pole powierzchni przekroju oraz odebrano stopnie swobody zgodnie ze schematem:  $U2, U3 = 0, UR1, UR2, UR3 = 0$ .



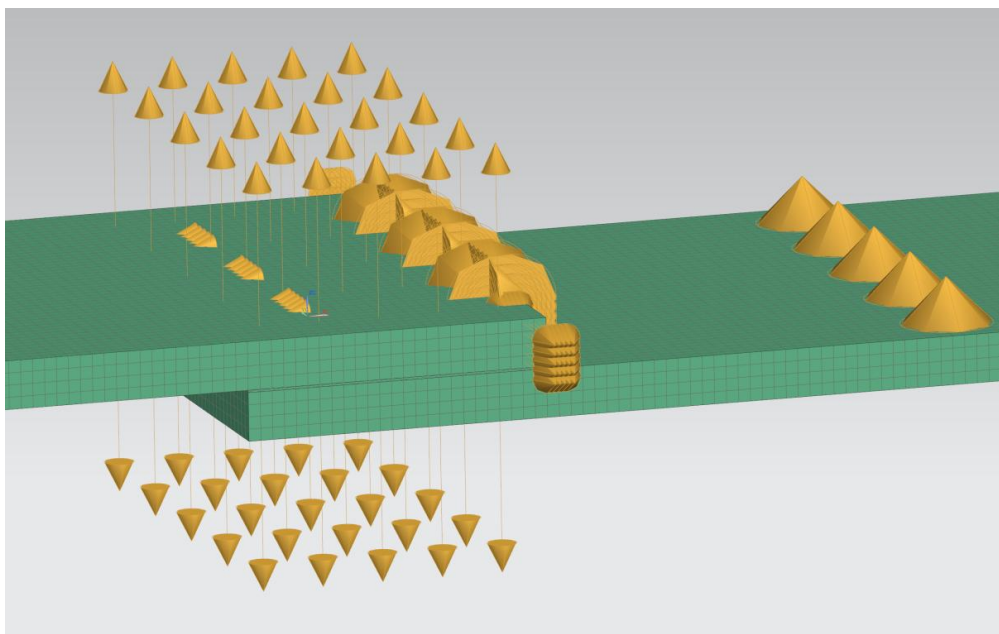
Rys 3. 7. Utwierdzenie węzłów siatki na końcu blachy [opracowanie własne]



Rys 3. 8. Drugi koniec modelu, elementy niebieskie reprezentują odebranie 5 stopni swobody, elementy czerwone reprezentują obciążenie w postaci siły [opracowanie własne]

Dodatkowo, obciążenie w postaci pięciu warstw węzłów ma możliwość przesuwania się w kierunku osi X (oś X jest zgodna z kierunkiem działania obciążenia). Na powierzchnię końcową blachy przyłożono siłę o wartości 2800 N dla blach ze stopu aluminium i 3600 N dla blach stalowych.

Ponieważ zakładkowe połączenie klejowe zbudowane jest z kilku elementów (warstwa kleju też jest osobnym elementem), istniała konieczność zdefiniowania rodzaju kontaktu pomiędzy sąsiednimi płaszczyznami styku elementów próbki, tj.: kontakt pierwszego łączonego elementu z warstwą kleju oraz kontakt drugiego łączonego elementu z warstwą kleju. Zastosowane rodzaje kontaktów w połączeniu to kontakt zdefiniowany jako „Glued”, czyli połączenie niesprężyste i nieelastyczne. Zastosowano automatyczną metodę znajdowania połączeń z ustawionym parametrem odległości wyszukiwania 0,04 mm. Przy grubości spoiny klejowej 0,1 mm daje to gwarancję braku interferencji powierzchni dolnej i górnej kleju.



Rys 3. 9. Model symulacji z określonymi połączeniami. Żółte elementy reprezentują połączenia typu „contact”  
[opracowanie własne]

Tak przygotowany model został rozwiązany przez solver. Wybrano solver Simcenter Nastran SOL 101, odpowiedni do rozwiązywania analizy typu statycznego liniowego. Wyniki obliczeń są prezentowane w postprocesorze jako mapa kolorów odpowiadających wartościom prezentowanych danych.

Wykorzystując modele jednozakładowych połączeń klejowych w wariancie bazowym, wariancie z wcięciami oraz w wariancie z otworami w strefie przykrawędziowej przeprowadzono obliczenia zgodnie z wyżej opisanymi warunkami. Wymiary geometryczne dla wszystkich wariantów modeli są takie same, przedstawione na rysunku 3.9. Badanym elementom przypisano właściwości zdefiniowane w tabelach 3.1 - 3.3. Wartość obciążenia przyjętego do obliczeń była równa nośności połączeń, którą otrzymano w badaniach eksperymentalnych.

### 3.3 Wyniki modelowania MES

Otrzymane wyniki obliczeń przedstawiono w postaci rozkładów naprężeń. Rozkłady naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej, będące miarą dla zjawiska oddzierania, które występuje w spoinie połączenia adhezyjnego zaprezentowano poniżej w formie tabeli porównując wariant bazowy z wariantami z zastosowanymi modyfikacjami na czołowej części zakładki połączenia klejowego.

Tab. 3. 4. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami szerokimi próbki ze stali SWD o szerokości 3 mm długości 3 mm.

Rodzaj naprężeń	Wariant bazowy	Wariant z wcięciami średnimi SWD_3
Naprężenia von Missesa		
Naprężenia styczne		
Naprężenia normalne		
Maksymalne naprężenia ścinające		

Tab. 3. 5. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami średnimi próbki ze stali SWS o szerokości 2 mm długości 1 mm.

Rodzaj naprężeń	Wariant bazowy	Wariant z wcięciami średnimi SWS_1
Naprężenia von Missesa		
Naprężenia styczne		
Naprężenia normalne		
Maksymalne naprężenia ścinające		

Tab. 3. 6. Rozkład naprężeń jednozakładowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami wąskimi próbki ze stali SWM o szerokości 1 mm długości 4 mm.

Rodzaj naprężeń	Wariant bazowy	Wariant z wcięciami wąskimi SWM 4
Naprężenia von Missesa		
Naprężenia styczne		
Naprężenia normalne		
Maksymalne naprężenia ścinające		

Tab. 3. 7. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z otworami próbki ze stali SO o średnicy 2 mm.

Rodzaj naprężeń	Wariant bazowy	Wariant z wcięciami średnimi SO_2
Naprężenia von Missesa	<p>Solution steel Result: bazowy_steel_001 Subcase: Statics 1, Kształotyczny 1 Naprężenia - Element Von Missesa Min: 0.000; Maks: 210.00; Jednostka: MPa</p>	<p>Solution steel Result: O2_steel_001 Subcase: Statics 1, Kształotyczny 1 Naprężenia - Element Von Missesa Min: 0.000; Maks: 210.00; Jednostka: MPa</p>
Naprężenia styczne	<p>Solution steel Result: bazowy_steel_001 Subcase: Statics 1, Kształotyczny 1 Naprężenia - Element XY Min: -37.54; Maks: 74.17; Jednostka: MPa Odkładki: Liczne - Przemysłowe; Wygląd: Wykres</p>	<p>Solution steel Result: O2_steel_001 Subcase: Statics 1, Kształotyczny 1 Naprężenia - Element XY Min: -57.63; Maks: 75.30; Jednostka: MPa Odkładki: Liczne - Przemysłowe; Wygląd: Wykres</p>
Naprężenia normalne	<p>Solution steel Result: bazowy_steel_001 Subcase: Statics 1, Kształotyczny 1 Naprężenia - Element Z Min: -35.07; Maks: 210.10; Jednostka: MPa Odkładki: Liczne - Przemysłowe; Wygląd: Wykres</p>	<p>Solution steel Result: O2_steel_001 Subcase: Statics 1, Kształotyczny 1 Naprężenia - Element Z Min: -44.73; Maks: 206.40; Jednostka: MPa Odkładki: Liczne - Przemysłowe; Wygląd: Wykres</p>
Maksymalne naprężenia ścinające	<p>Solution steel Result: bazowy_steel_001 Subcase: Statics 1, Kształotyczny 1 Naprężenia - Element Maks ścinające Min: 0.000; Maks: 113.50; Jednostka: MPa Odkładki: Liczne - Przemysłowe; Wygląd: Wykres</p>	<p>Solution steel Result: O2_steel_001 Subcase: Statics 1, Kształotyczny 1 Naprężenia - Element Maks ścinające Min: 0.000; Maks: 113.50; Jednostka: MPa Odkładki: Liczne - Przemysłowe; Wygląd: Wykres</p>

Tab. 3. 8. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami szerokimi próbki ze stopu aluminium AWD o szerokości 3 mm długości 1 mm.

Rodzaj naprężeń	Wariant bazowy	Wariant z wcięciami wąskimi AWD_1
Naprężenia von Missesa		
Naprężenia styczne		
Naprężenia normalne		
Maksymalne naprężenia ścinające		

Tab. 3. 9. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami średnimi próbki ze stopu aluminium AWS o szerokości 2 mm długości 3 mm.

Rodzaj naprężeń	Wariant bazowy	Wariant z wcięciami wąskimi AWS_3
Naprężenia von Missesa		
Naprężenia styczne		
Naprężenia normalne		
Maksymalne naprężenia ścinające		

Tab. 3. 10. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami wąskimi próbki ze stopu aluminium AWM o szerokości 1 mm długości 2 mm.

Rodzaj naprężeń	Wariant bazowy	Wariant z wcięciami wąskimi AWM 2
Naprężenia von Missesa		
Naprężenia styczne		
Naprężenia normalne		
Maksymalne naprężenia ścinające		

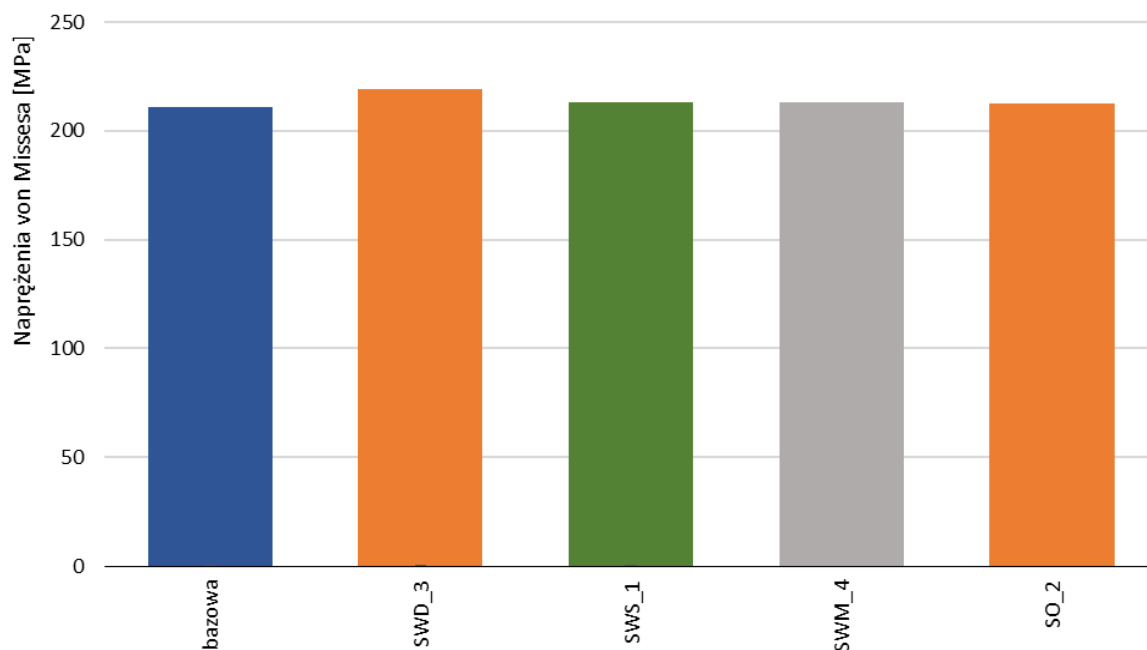
Tab. 3. 11. Rozkład naprężeń jednozakładowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z otworami próbki ze stopu aluminium AO o średnicy 4 mm.

Rodzaj naprężeń	Wariant bazowy	Wariant z wcięciami wąskimi AO_4
Naprężenia von Missesa		
Naprężenia styczne		
Naprężenia normalne		
Maksymalne naprężenia ścinające		

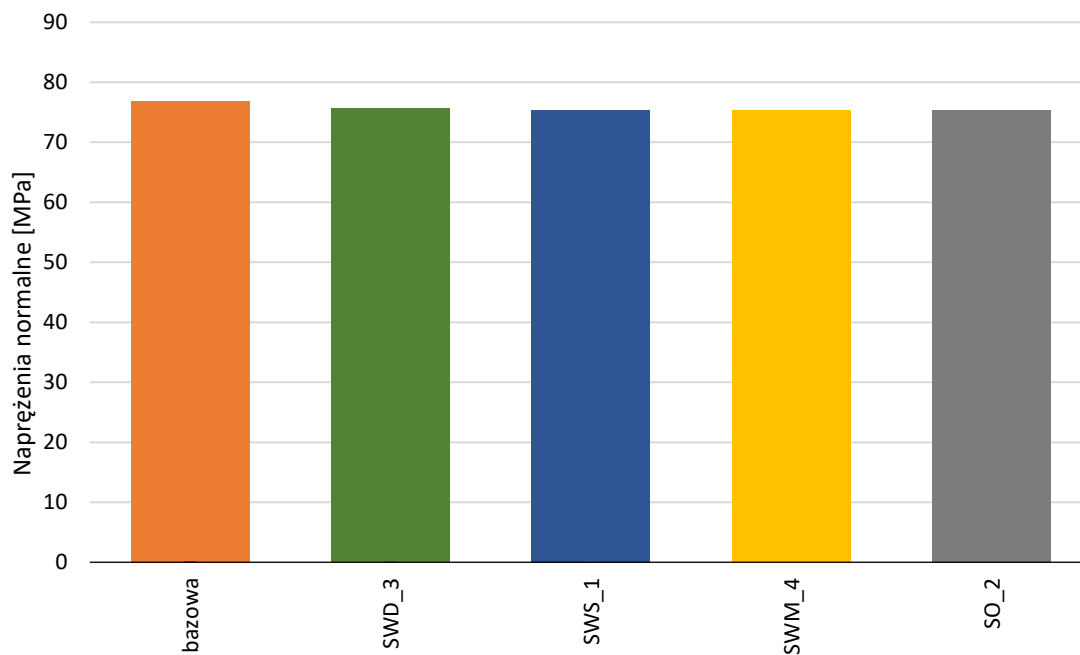
Na podstawie rozkładów naprężeń na spoinach jednozakładkowych połączeń klejowych przedstawionych w tabelach 3.4 – 3.11 można stwierdzić, że naprężenia maksymalne występują na końcach spoiny. Z kolei w części środkowej spoiny zlokalizowane są naprężenia minimalne.

Wyniki analizy numerycznej metodą elementów skończonych, przedstawionych w tabelach 3.4 – 3.11 wskazują, iż w większości analizowanych przypadków zastosowanie wcięć albo otworów na krawędzi zakładki nieznacznie przyczynia się do zmniejszenia maksymalnych wartości naprężeń występujących w strefie przykrawędziowej jednozakładkowego połączenia klejowego. W wyniku zastosowanych perforacji w czołowej części blachy zmniejszają się wartości naprężeń von Missesa, naprężeń maksymalnych głównych, naprężeń normalnych oraz naprężeń stycznych w spoinach klejowych połączeń obciążonych na rozciąganie. Jednakże, nie dla wszystkich badanych parametrach te wyniki są zadowalające.

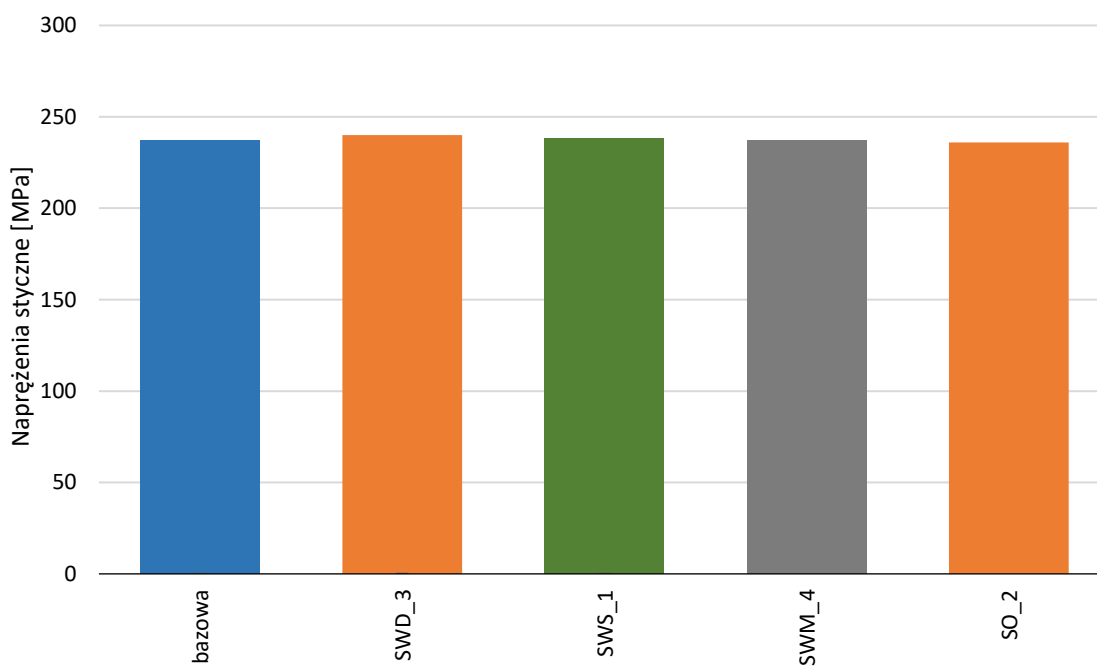
Na rysunkach 3.10 – 3.12 przedstawiono zestawienie maksymalnych naprężeń w spoinach dla wybranych wariantów z zastosowanymi wcięciami i otworami dla próbek ze stali S235JR.



Rys 3. 10. Porównanie wariantów naprężeń von Missesa w spoinie jednozakładkowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stali [opracowanie własne]

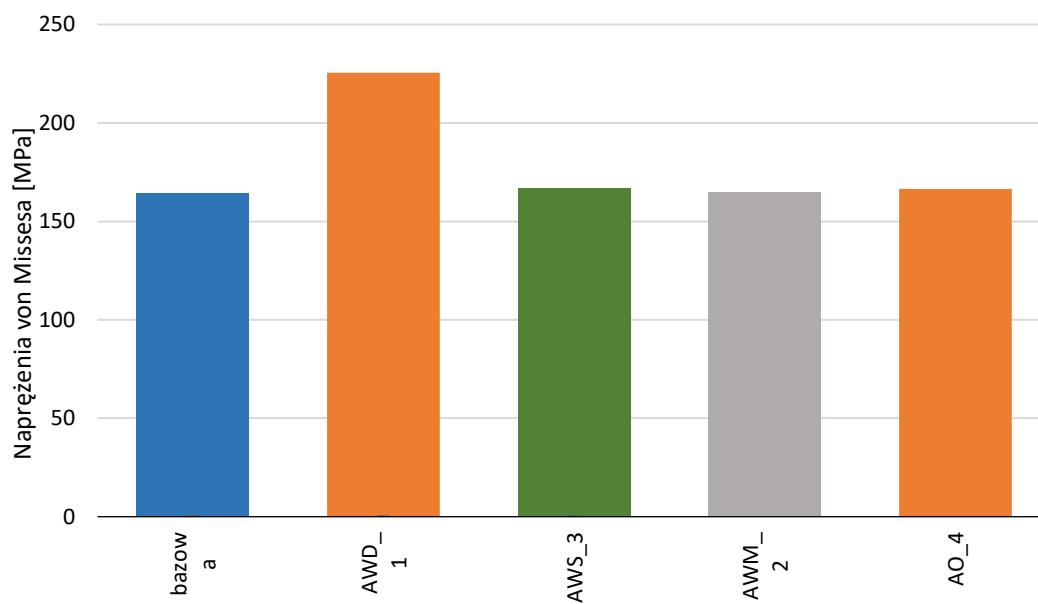


Rys 3. 11. Porównanie wariantów napężenia normalnych w spoinie jednozakładowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stali [opracowanie własne]

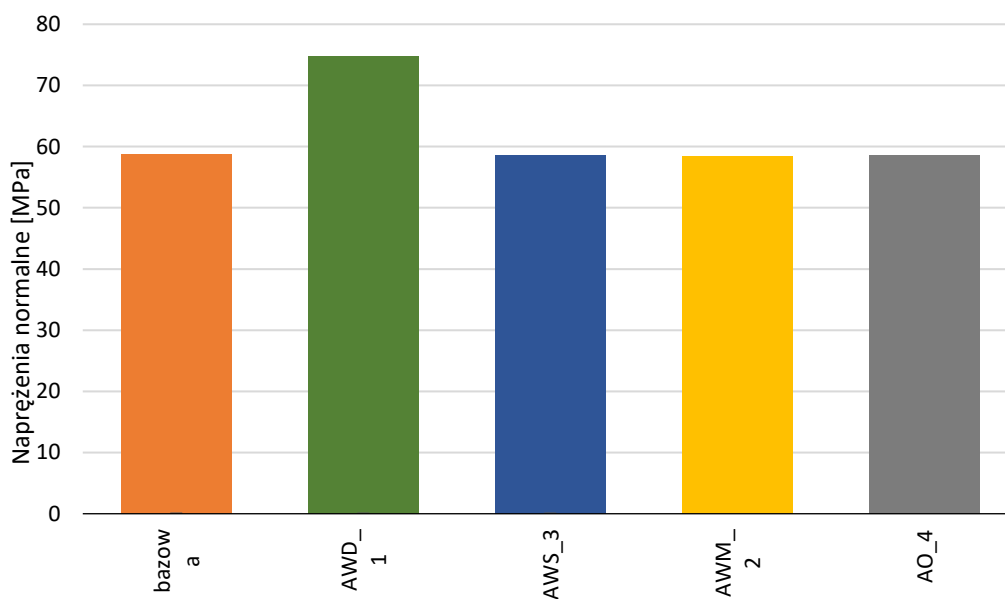


Rys 3. 12. Porównanie wariantów napężenia stycznych w spoinie jednozakładowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stali [opracowanie własne]

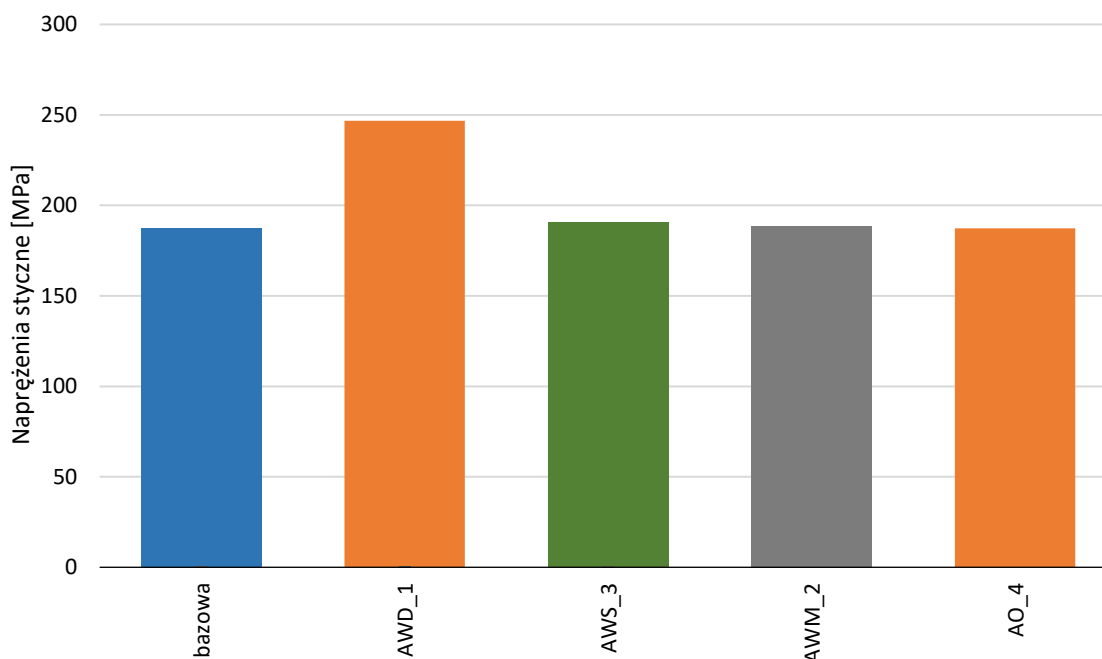
Na rysunkach 3.13 – 3.15 przedstawiono zestawienie maksymalnych naprężeń w spoinach dla wybranych wariantów z zastosowanymi wcięciami i otworami dla próbek ze stopu aluminium EN AW 2024-T3.



Rys 3. 13. Porównanie wariantów naprężeń von Missesa w spoinie jednozakładowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stopu aluminium [opracowanie własne]



Rys 3. 14. Porównanie wariantów naprężeń normalnych w spoinie jednozakładowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stopu aluminium [opracowanie własne]



Rys 3. 15. Porównanie wariantów naprężeń stycznych w spoinie jednozakładkowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stopu aluminium [opracowanie własne]

Poniżej w tabelach zestawienia wyników analizy metody elementów skończonych dla wybranych próbek jednozakładkowego połączenia klejowego dla obu badanych metali.

Tab. 3. 12. Maksymalne wartości naprężeń w spoinach jednozakładkowych połączeń klejowych dla wybranych wariantów próbek ze stali

Wariant	bazowy	SWD 3	SWS 1	SWM 4	SO 2
Rodzaj naprężenia	Wartość naprężenia [MPa]	Wartość naprężenia [MPa]	Wartość naprężenia [MPa]	Wartość naprężenia [MPa]	Wartość naprężenia [MPa]
Von Missesa	211,96	219,12	213,11	213,04	212,60
Normalne	75,47	75,55	75,37	75,39	75,36
Styczne	236,93	241,77	238,47	237,11	236,36
Maksymalne główne	115,59	116,10	115,69	115,20	115,08

Tab. 3. 13. Maksymalne wartości naprężeń w spoinach jednozakładkowych połączeń klejowych dla wybranych wariantów próbek ze stopu aluminium.

Wariant	bazowy	AWD 1	AWS 3	AWM 2	AO 4
Rodzaj naprężenia	Wartość naprężenia [MPa]	Wartość naprężenia [MPa]	Wartość naprężenia [MPa]	Wartość naprężenia [MPa]	Wartość naprężenia [MPa]
Von Missesa	164,44	225,51	166,77	165,01	166,69
Normalne	58,87	74,72	58,62	58,55	58,68
Styczne	187,56	246,88	191,66	188,70	187,54
Maksymalne główne	90,77	123,36	91,52	165,01	90,26

Wartości maksymalnych naprężeń w spoinach klejowych połączeń obciążonych na rozciąganie, które zostały przedstawione na rysunkach 3.10 – 3.15 oraz w tabelach 3.12 i 3.13 wskazują, że najbardziej zbliżone do pożądanego efektu obniżenia wartości maksymalnych naprężeń występuje w przypadku naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni spoiny. W przypadku próbek wykonanych ze stali są to wartości o ok. 1 % większe dla wariantów z modyfikacjami w stosunku do wariantu bazowego. Z kolei w przypadku naprężeń von Missesa porównując wariant bazowy z wariantami z modyfikacjami jest to o ok. 0,5% więcej, a nawet w przypadku wariantu z wcięciami szerokimi o ok. 3% więcej. Natomiast w przypadku naprężeń maksymalnych głównych wartości są zbliżone do wariantu bazowego, a nawet mniejsze w przypadku wariantu z otworami oraz wariantu z wcięciami wąskimi dla próbek ze stali. Z kolei dla próbek ze stopu aluminium naprężenia maksymalne główne są mniej dla wariantu z otworami o ok. 0,7%. Ponadto, badania wykazały bardzo wyraźny wzrost naprężeń von Missesa, naprężeń stycznych oraz naprężeń normalnych dla wariantu z wcięciami szerokimi próbki ze stopu aluminium, jest to ok. 20%.

Na podstawie wyznaczonych wartości naprężeń dzięki analizie metodą elementów skończonych można stwierdzić, że zastosowanie modyfikacji geometrii w czołowej części złącza nie daje poprawy, albo daje znikomą poprawę, co zaobserwowano w kilku przypadkach. Obserwowany jest niewielki spadek wartości naprężeń w spoinie klejowej u wybranych wariantów wcięć lub otworów. Niemniej jednak, zakres uzyskanych w wyniku analizy numerycznej zmian naprężeń między wariantami jest zbliżony do wyników badań statycznych potwierdzonych eksperymentalnie w dalszej części niniejszej pracy.

Podsumowując, wyniki analiz numerycznych wskazują, że zastosowanie modyfikacji w geometrii zakładki połączenia klejowego nie wykazuje znacznej redukcji naprężeń w spoinie klejowej. Jednakże, największy spadek wartości naprężeń jest zauważalny w przypadku naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni spoiny klejowej. Zjawisko jakim jest zmniejszenie wartości naprężeń normalnych prostopadłych prowadzi do zmniejszenia naprężeń zredukowanych w spoinie i skutkuje wzrostem wytrzymałości połączeń klejowych.

Poddane analizie wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych MES, mają znaczenie jakościowe, a nie ilościowe, które nie uwzględniają nieliniowych właściwości kleju. Ich celem było wyjaśnienie przyczyn wzrostu wytrzymałości jednozakładowych połączeń klejowych z zastosowanymi modyfikacjami w czołowej części złącza.

Wprawdzie wykazano, że rozważane modyfikacje konstrukcyjne nie mają znaczącego wpływu na maksymalne wartości naprężeń w spoinie klejowej. Jednak złącza klejowe struktur cienkościennych cechują się nierównomiernym rozkładem naprężeń przy obciążeniach. W związku z tym należy szerzej poddać dyskusji wpływ wcięć oraz otworów przy czołowych krawędziach elementów łączonych na rozkład naprężeń w obszarze spoiny klejowej.

Na podstawie porównania rozkładów naprężeń dla różnych wariantów połączeń klejowych można wyciągnąć szereg istotnych wniosków. Jednoznacznie wykazano, że modyfikacje geometryczne strefy przykrawędziowej mają istotny wpływ na rozkład naprężeń na powierzchni złącza klejowego. Można zaobserwować, że w przypadku wariantów z wcięciami, w narożach wcięć dochodzi do koncentracji naprężeń. Podobne zjawisko widoczne jest dla wariantów z otworami, dochodzi w tych przypadkach do koncentracji naprężeń przy obwodzie otworów w kierunku zgodnym z obciążeniem złącza. Zjawisko lokalnej koncentracji naprężeń przy wcięciach i otworach zmienia charakter rozkładu naprężeń w obszarze całej powierzchni złącza. Dla wariantu bazowego, tj. pozbawionego modyfikacji, typowo przy czołowej krawędzi połączenia dochodzi do spiętrzenia naprężeń, zarówno składowych stycznych jak i normalnych. Spiętrzenia te są jednolite wzdłuż szerokości zakładki, jedynie przy krawędziach ulegają redukcji. Dla wariantów z modyfikacjami dochodzi do lokalnego przesunięcia spiętrzenia naprężeń od krawędzi czołowej elementów klejonych w kierunku naroży wcięć oraz obwodu otworów. Mając na uwadze mechanizmy pęknięcia zmęczeniowego, które inicjowane są w obszarach, w których dochodzi do spiętrzenia naprężeń, daje to podstawy by sądzić, że zastosowane modyfikacje konstrukcyjne mogą mieć wpływ na trwałość zmęczeniową połączeń. Analiza rozkładu naprężeń wskazuje, że przy obciążeniach zmęczeniowych hipotetycznie dochodziłoby do lokalnego odsunięcia cyklicznie działających spiętrzeń naprężeń od czołowej krawędzi. Zjawisko to powiązane jest z lokalnym rozpraszaniem energii w masie utwardzonego kleju wypełniającego wcięcia i otwory. W związku z tym hipotetycznie inicjacja pęknięcia zmęczeniowego oraz propagacji pęknięć w przypadku próbek z modyfikacjami powinny następować według odmiennego mechanizmu niż w przypadku jednolitego rozkładu spiętrzenia naprężeń dla wariantu bazowego. Klej wypełniający wcięcia oraz otwory pochłaniając energię bezpośrednio w obszarach lokalnych spiętrzeń naprężeń może wpływać na spowolnienie rozwoju pęknięć zmęczeniowych, gdyż mówiąc obrazowo powoduje amortyzowanie obciążeń w każdym cyklu zmęczeniowym. Dodatkowo wymuszenie niejednolitego spiętrzenia naprężeń wzdłuż czołowej krawędzi złącza

hipotetycznie może spowalniać inicjację pęknięcia zmęczeniowego, która zachodzi przy tej krawędzi.

Wracając natomiast do porównania maksymalnych wartości naprężeń dla poszczególnych wariantów, ze względu na nieznaczne ich różnice, można spodziewać się, iż zastosowane modyfikacje w postaci wcięć i otworów nie będą miały istotnego wpływu na wytrzymałość statyczną połączeń.

## 4. Badania statyczne

### 4.1 Opis metodyki badań statycznych

Do realizacji niniejszej pracy niezbędne było wykorzystanie sprzętu umożliwiającego wykonanie badań oraz przeprowadzenie niezbędnych pomiarów. Analiza połączeń klejowych oraz ich badania wytrzymałościowe zostały wykonane z wykorzystaniem parku maszynowego Politechniki Rzeszowskiej. Eksperymentalne badania statyczne zostały wykonane na urządzeniu wytrzymałościowym Zwick/Roell Z100, rys. 4.1. Próbkę poddano także eksperymentalnym badaniom zmęczeniowym używając do tego maszyny HT-9711, rys. 4.2.



Rys. 4. 1. Maszyna wytrzymałościowa Zwick/Roell Z100 [opracowanie własne]



Rys. 4. 2. Maszyna do badań zmęczeniowych HT-9711 (Hung Ta Instrument Co., Taichung City, Tajwan)  
[opracowanie własne]

## 4.2 Charakterystyka blach stosowanych w badaniach eksperymentalnych

Badania eksperymentalne jednozakładkowych połączeń klejowych przeprowadzono z użyciem blach ze stali gatunku S235JR oraz ze stopu aluminium EN AW 2024-T3 o grubości 2 mm.

Stal gatunku S235JR jest konstrukcyjną stalą niestopową o szerokim zakresie zastosowań w budownictwie, przemyśle maszynowym, inżynierii ciężkiej i transportowej, energetyce i budownictwie mostowym. Ze stali S235JR wykonywane są różnego rodzaju profile i konstrukcje metalowe, części i elementy urządzeń naziemnych i podziemnych, konstrukcje z tej stali wykorzystywane są do budowy obiektów przemysłowych i mieszkalnych, części wież transmisyjnych, elementów wyposażenia, konstrukcji morskich, platform wiertniczych i gazowych, mostów samochodowych i innych konstrukcji.

Stal S235JR jest jednym z najpopularniejszych typów tego materiału. Symbole odnoszące się do konkretnego gatunku stali zawarte są w normie PN-EN 10027-1:2007 [116] oraz normie PN-EN 10027-2:2007 [117]. Oznaczenia dla stali S235JR określają odpowiednio: symbol S

określa zastosowanie danego stopu stali, czyli w tym przypadku stal konstrukcyjną, liczba 235 jest określeniem właściwości granicy plastyczności wyrażona w MPa przy najmniejszej grubości mierzonego materiału, symbol JR odnosi się do cech dodatkowych gotowych produktów, mianowicie w formie płaskich blach walcowanych na gorąco i długich odcinków w postaci szyn.

Tab. 4. 1 Skład chemiczny stali S235JR zgodnie z EN 10025-2:2004 [115].

Węgiel (C)	≤ 0,17 %
Mangan (Mn)	≤ 1,40 %
Fosfor (P)	≤ 0,035 %
Siarka (S)	≤ 0,035 %
Azot (N)	≤ 0,012 %
Miedź (Cu)	≤ 0,55 %

Skład chemiczny stali S235JR przedstawiony w tabeli 4.1 to jeden z czynników, które mają wpływ na parametry techniczne, właściwości i zastosowanie tego materiału. Stal S235JR oczywiście poza żelazem zawiera mniej niż 0,2 % węgla i około 1,4 manganu oraz inne dodatki już w znacznie mniejszych ilościach. Niska zawartość węgla oraz spora manganu świadczą o tym, że materiał jest odporny na rozciąganie i nie pęka.

Tab. 4. 2. Właściwości mechaniczne stali S235JR zgodnie z EN 10025-2:2004 [115]

Min. wytrzymałość na rozciąganie $R_m$	360-510 MPa
Min. granica plastyczności $R_{p0,2}$	ok. 235 MPa
Twardość	< 120 HB
Wydłużenie A5	18-21 %
Moduł sprężystości wzdłużnej	210 GPa

Tab. 4. 3. Właściwości fizyczne stali S235JR zgodnie z EN 10025-2:2004 [115]

Gęstość	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura topnienia	1420-1460 °C
Współczynnik rozszerzalności liniowej	17,2 °C
Przewodność cieplna	45 W/mK
Konduktywność elektryczna względna	1,25 %ZSZIK

Cechą charakterystyczną, jaką wyróżnia się gatunek stali S235JR, jest granica plastyczności. Jej wartość jest wyrażona parametrem  $R_e$  [N/mm<sup>2</sup>] i oznacza wartość naprężenia, przy której dochodzi do trwałych zmian w strukturze materiału. Oznacza to, że po wyeliminowaniu siły oddziałującej na materiał powróci on do swojej pierwotnej postaci. Dla opisywanej stali minimalna granica plastyczności wynosi 235 MPa. Drugim istotnym parametrem stali S235JR jest wytrzymałość na rozciąganie. Wyraża się ją wartością  $R_m$

[N/mm<sup>2</sup>] i dla tego gatunku stali wartości wytrzymałości na rozciąganie są od 360 do 510 MPa. Do opisu właściwości tego materiału określa się minimalne wydłużenie A, które wynosi 26% oraz minimalną pracę łamania KV, która osiąga 27 J.

Właściwości stali S235JR mogą się nieznacznie różnić zależnie od tego, jakie domieszki oraz w jakich ilościach znajdują się w strukturze materiału. W ujęciu ogólnym ten gatunek stali jest zaliczany do uniwersalnych i charakteryzuje się:

- wysoką wytrzymałością,
- znaczną ciągliwością,
- drobnoziarnistością,
- podatnością na obróbkę skrawaniem,
- podatnością na cięcie palnikiem gazowym i plazmą.

Ze względu na swoje właściwości mechaniczne stal S235JR znajduje szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach produkcji. Stal ta używana jest do budowy konstrukcji narażonych na działanie większych obciążeń i udarności w obniżonej temperaturze. Stal S235JR znajduje swoje zastosowanie wszędzie tam, gdzie jest to uzasadnione ekonomicznie m.in. produkuje się części maszyn oraz całe konstrukcje, a także elementy silników, zbiorniki, części mostów, wagony kolejowe, elementy nośne w konstrukcjach urządzeń dźwigowych oraz rozmaite konstrukcje budowlane.

Badania eksperymentalne jednozakładowych połączeń klejowych zostały przeprowadzone także na próbkach wykonanych z blachy stopu aluminium EN AW 2024-T3, który jest jednym z najbardziej znanych stopów aluminium o wysokiej wytrzymałości. Wybrano ten rodzaj aluminium, ponieważ ma szerokie zastosowanie w produkcji klejonych konstrukcji, ze względu na doskonałą wytrzymałość właściwą oraz wytrzymałość zmęczeniową. Dzięki wysokim parametrom mechanicznym i doskonałej odporności na zmęczenie jest stosowany do wytwarzania elementów konstrukcyjnych, od których wymagany jest dobry stosunek wytrzymałości do masy. Jest łatwo obrabialny oraz formowalny w stanie wyżarzonym i może być następnie poddawany obróbce cieplnej. Materiał stosowany w badaniach został dostarczony w stanie T3 tzn. poddany został obróbce cieplnej, następnie formowaniu na zimno i naturalnemu starzeniu.

Tab. 4. 4. Skład chemiczny stopu EN AW 2024 zgodnie z PN-EN 573-3:2019-12 [118]

Krzem (Si)	≤ 0,5 %
Żelazo (Fe)	≤ 0,5 %
Miedź (Cu)	3,8 – 4,9 %
Mangan (Mn)	0,3 – 0,9 %
Magnez (Mg)	1,2 – 1,8 %
Chrom (Cr)	≤ 0,1 %
Cynk (Zn)	≤ 0,25 %
Tytan (Ti)	≤ 0,15 %
Aluminium (Al)	reszta

Odporność na korozję tego materiału jest stosunkowo niska, dlatego stop aluminium EN AW-2024 T3 do zastosowań lotniczych jest dostarczany w formie platerowanej z cienką warstwą powierzchniową aluminium (ang. Alclad) o wysokiej czystości [109]. Z racji tego, iż materiał jest stopem z dodatkiem miedzi, dzięki czemu mieszanka ta zapewnia doskonałą równowagę między wytrzymałością a wagą, pokrycie dodatkową warstwą aluminium pomaga chronić przed rdzewieniem oraz stop staje się trwalszy i nadaje do większej liczby zastosowań. Skład chemiczny podano w tabeli 4.4, natomiast właściwości mechaniczne i fizyczne w tabelach 4.5 – 4.6 określone zgodnie z normą PN-EN 573-3:2019-12 [118].

Tab. 4. 5. Właściwości mechaniczne stopu aluminium EN AW-2024 zgodnie z PN-EN 573-3:2019-12 [118]

Min. wytrzymałość na rozciąganie $R_m$	360-435 MPa
Min. granica plastyczności $R_{p0,2}$	250-290 MPa
Twardość	104-123 HB
Wydłużenie A5	12-14 %
Moduł sprężystości wzdłużnej	73 GPa

Tab. 4. 6. Właściwości fizyczne stopu aluminium EN AW-2024 zgodnie z PN-EN 573-3:2019-12 [118]

Gęstość	2,79 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura topnienia	500-640 °C
Współczynnik rozszerzalności liniowej	23,1 · 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Przewodność cieplna	121-193 W/mK
Konduktywność elektryczna względna	29-50,5 %IACS
Rezystywność elektryczna właściwa	34-57 nΩ·m

Badania eksperymentalne przeprowadzono na próbkach wykonanych z powyżej opisanych materiałów sklejonych klejem epoksydowym Araldite 2014-2. Do kluczowych właściwości tego kleju należy wysoka odporność temperaturowa i chemiczna, niski skurcz, odporność na

wodę i różne chemikalia oraz bardzo dobre wypełnianie szczelin. Klej strukturalny Araldite 2014 to dwuskładnikowy, utwardzający się w temperaturze pokojowej, tiksotropowy klej w paście o wysokiej wytrzymałości, dobrej odporności na środowisko i doskonałej odporności chemicznej. Substancja klejowa stosowana jest do łączenia metali, komponentów elektronicznych i wielu innych elementów, w których podczas pracy można spotkać się z wyższą niż normalnie temperaturą lub agresywnym środowiskiem. Niskie wydzielanie gazów sprawia, że klej ten nadaje się do specjalistycznych zastosowań w telekomunikacji elektronicznej i przemyśle lotniczym. Producent Huntsman Corporation określa w karcie katalogowej produktu wytyczne dotyczące przygotowania powierzchni klejonych dla zachowania odpowiedniej wytrzymałości i trwałości klejonego złącza. Opisano tam także szczegółowo jak należy nakładać warstwę kleju na sklejjane elementy.

Producent kleju Araldite 2014 podaje średnią wytrzymałość na ścinanie typowych połączeń metal-metal wg ISO 4587, utwardzanych przez 16 godzin w temperaturze 40°C i testowany w temperaturze 23°C dla stali 17,15 MPa oraz dla aluminium 19,04 MPa.



Rys. 4. 3. Tubka kleju Araldite 2014-2

### 4.3 Przygotowanie powierzchni do klejenia

Przygotowanie próbek do badań rozpoczęło się od dokładnego oczyszczenia i przygotowania powierzchni do klejenia, aby zapewnić optymalne warunki dla procesu klejenia. Klejenie wykonano zgodnie z instrukcjami producenta kleju, uwzględniając takie czynniki jak temperatura, wilgotność i czas utwardzania, które mogą wpływać na jakość połączenia klejowego.

Dla uzyskania optymalnego rezultatu klejenia niezbędne jest właściwe przygotowanie powierzchni klejonych elementów. Wytrzymałość złącza klejowego w dużym stopniu zależy od adhezji pomiędzy łączonymi powierzchniami i klejem. Należy zdawać sobie sprawę, że połączenia klejowe będą tym mocniejsze, im staranniej zostaną przygotowane i oczyszczone powierzchnie. Dla uzyskania takiego efektu próbki przeznaczone do badań poddano obróbce strumieniowo-ścierniej elektrokorundem. Do tej operacji wykorzystano maszynę marki New-Tech przedstawioną na rysunku 4.4.



Rys. 4. 4. Urządzenie do obróbki strumieniowo ścierniej [opracowanie własne]

Obróbkę strumieniowo-ścierną przeprowadzono korundem glinowym w formie F40 przy ciśnieniu 0,8 MPa używając dyszy o średnicy 6 mm. Odległość dyszy od próbki to 150 mm oraz czas obróbki to 60 s. Kolejno po tej operacji każdą z płytek oczyszczono z pyłu strumieniem sprężonego powietrza. Ostatnim zabiegiem przygotowania powierzchni do klejenia było odtłuszczenie. Ma ono na celu całkowite usunięcie oleju, tłuszczu, kurzu i innych brudnych pozostałości z obu klejonych powierzchni. Do odtłuszczenia próbek wykorzystano szybko odparowujący aceton.

#### 4.4 Klejenie próbek

Klejenie wykonano zgodnie z instrukcjami producenta kleju, uwzględniając takie czynniki jak temperatura, wilgotność i czas utwardzania, które mogą wpływać na jakość połączenia

klejowego. Klejenie płytek przeprowadzono na odpowiednio przygotowanych powierzchniach poprzez naniesienie masy klejowej. Tak aby odpowiednio przygotowany klej można było rozprowadzić bezpośrednio z opakowania na powierzchnię zakładki, użyto końcówki mieszającej. Proces klejenia odbywał się kolejno nanosząc substancję klejową na powierzchnię jednej zakładki próbki, a następnie łączono ją z drugą. Powstało w ten sposób połączenie zakładkowe, którego spoina miała wymiary 25x12,5x0,1 mm.

Płytki, które posmarowano substancją klejową zostały ułożone w przyrządzie do klejenia, rys. 4.5.



Rys. 4. 5. Przyrząd do klejenia z próbkami [opracowanie własne]

Próbki spoiny klejowej utwardzono pod stałym ciśnieniem 0,1 MPa. Próbki znajdowały się w przyrządzie przez 24 godziny mimo iż producent wyznacza minimalny czas utwardzania 5 godzin. Temperatura w pomieszczeniu wynosiła  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . Po wyciągnięciu próbek z przyrządu usunięto wypływki kleju.

#### 4.5 Badanie chropowatości i SEP

Podczas przygotowania powierzchni do klejenia należy zwrócić szczególną uwagę na jej strukturę geometryczną, a w szczególności na chropowatość. Chropowatość powierzchni tworzą elementy powstałe w procesie kształtowania się samej warstwy, nie zawierające falistości i odchyłek kształtu [120]. Odpowiednie schropowacenie powierzchni zwiększa liczbę mikroporów oraz zwiększa się rzeczywista powierzchnia zwilżania na jednostkę powierzchni

nominalnej, co jest korzystne z punktu widzenia wytrzymałości połączeń klejowych. Dzięki temu zostają zwielokrotnione działania sił międzycząsteczkowych, dyfuzja czy chemisorpcja. Chropowatość powierzchni nie może być również za duża ponieważ prowadzi to do utworzenia osłabiającej warstwy granicznej w strefie kohezijnej materiału a w rezultacie do pogorszenia właściwości połączenia.

Biorąc pod uwagę wnioski z przeglądu literatury oraz dotychczasowe doświadczenia autorów przyjęto jednolitą metodę przygotowania powierzchni blach przed klejeniem jaką jest piaskowanie. Próbkę ze stopu aluminium EN AW 2024-T3 oraz stali S235JR przed klejeniem poddano obróbce strumieniowo-ściernej elektrokorundem. Obróbkę przeprowadzono z wykorzystaniem elektrokorundu 95A o średniej wielkości ziarna równej 0,27 mm pod ciśnieniem 0,8 MPa. Czas obróbki wynosił 20s natomiast odległość dyszy od powierzchni blach około 100 mm.

Próbki po obróbce poddano pomiarom chropowatości przy użyciu urządzenia T8000 RC120-400 firmy Hommel-Etamic (rys. 4.6). Jest to urządzenie o budowie modułowej zapewniające pomiar chropowatości, konturu oraz topografii 3D. Dokonano pomiarów parametrów chropowatości w układzie 3D zgodnie z obowiązującą normą PN EN-ISO 25178-2:2012 [120]. Analizie poddano następujące parametry wysokości:

- Sq – średnie kwadratowa wysokość powierzchni [ $\mu\text{m}$ ],
- Ssk – asymetria powierzchni,
- Sku – kurtoza powierzchni,
- Sp – maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni [ $\mu\text{m}$ ],
- Sy – maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni [ $\mu\text{m}$ ],
- Sz – maksymalna wysokość powierzchni [ $\mu\text{m}$ ],
- Sa – średnia arytmetyczna wysokość powierzchni [ $\mu\text{m}$ ],



Rys. 4. 6. Stanowisko do pomiaru SGP [opracowanie własne]

W tabeli 4.7 przedstawiono mapy warstwiczne, widoki izometryczne, profile chropowatości oraz parametry wysokości dla stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz stali S235JR po obróbce strumieniowo-ściernej.

Uzyskane w wyniku obróbki strumieniowo-ściernej profilogramy stanowią odzwierciedlenie zarysu wybranego odcinka pomiarowego powierzchni badanych materiałów. Porównując profile powierzchni obu badanych materiałów, można zauważyć, iż powierzchnie zarówno stopu aluminium jak i stali odznaczały się występowaniem pojedynczych wierzchołków nierówności, których wysokość znacznie odbiegała od wartości średnich w przedziale odcinka elementarnego.

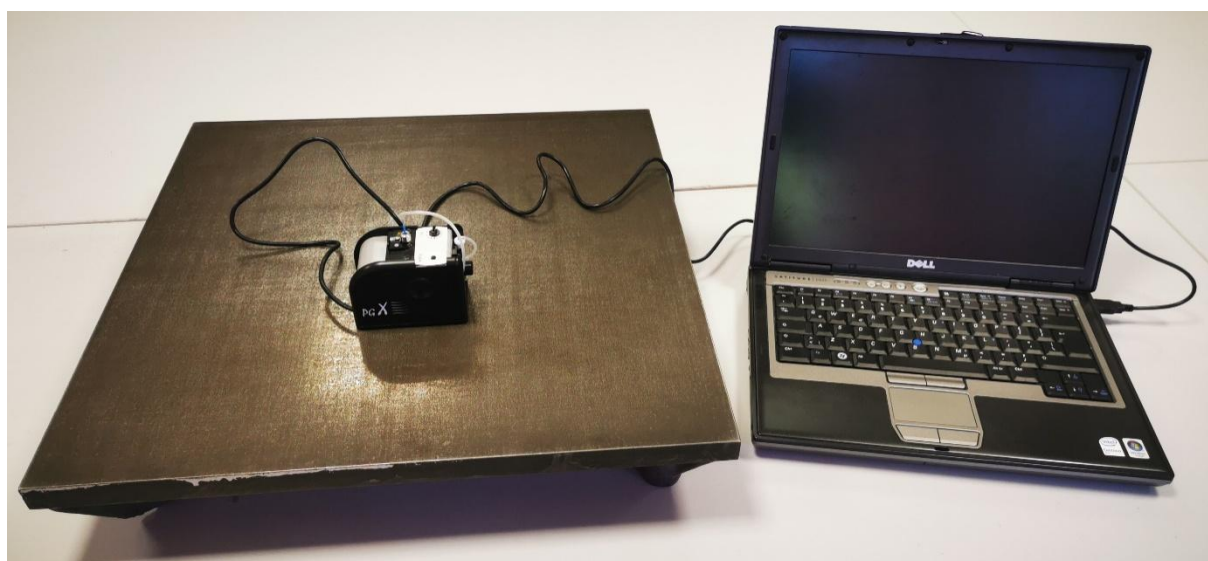
Tab. 4. 7. Wyniki SGP dla stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz stali S235JR po piaskowaniu

	EN AW-2024-T3	S235JR
<b>Mapa warstwiczna</b>		
<b>Widok izometryczny</b>		
<b>Profil chropowatości</b>		
<b>Parametry wysokości</b>	$Sq = 1,93 \mu\text{m}$ $Ssk = 0,60$ $Sku = 6,84$ $Sp = 26,60 \mu\text{m}$ $Sv = 12,20 \mu\text{m}$ $Sz = 38,80 \mu\text{m}$ $Sa = 1,42 \mu\text{m}$	$Sq = 2,54 \mu\text{m}$ $Ssk = -1,06$ $Sku = 6,56$ $Sp = 18,00 \mu\text{m}$ $Sv = 18,20 \mu\text{m}$ $Sz = 36,20 \mu\text{m}$ $Sa = 1,85 \mu\text{m}$

Powierzchnia po obróbce strumieniowo-ścierniej dla stopu EN AW 2024-T3 charakteryzowała się pełnym pokryciem śladami elektrokorundu, z kolei dla stali S235JR widoczne są nieliczne defekty. Średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni  $Sa$  dla stopu aluminium wynosiło  $1,42 \mu\text{m}$ , z kolei dla stali  $1,85 \mu\text{m}$ . Największa wysokość powierzchni  $Sz$

dla stopu aluminium wynosiła 38,80  $\mu\text{m}$ , na co składały się maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni  $S_p$  – 26,60  $\mu\text{m}$  oraz maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni  $S_v$  – 12,20  $\mu\text{m}$ . Widoczna jest tu znacząca różnica między parametrami maksymalnymi ( $S_p$  i  $S_v$ ). Z kolei dla stali S235JR uzyskano niewiele niższą maksymalną wysokość powierzchni  $S_z$  równą 36,20  $\mu\text{m}$ . W tym przypadku parametry  $S_p$  oraz  $S_v$  wynosiły odpowiednio 18  $\mu\text{m}$  oraz 18,2  $\mu\text{m}$ , co świadczy o bardziej jednorodnej powierzchni. Powierzchnia dla stali S235JR charakteryzowała się również skośnością ( $S_{sk} = -1,06$ ), ujemna wartość tego współczynnika wskazuje na powierzchnię o wzniesieniach płaskowyżowych, co może być korzystne podczas klejenia, tworząc większą powierzchnię wnikania kleju. W przypadku stopu aluminium dodatnia wartość parametru  $S_{sk}$  równa 0,60 świadczyła o obecności na powierzchni stromych wzniesień o ostrych wierzchołkach. Współczynnik nachylenia powierzchni  $S_{ku}$  określany jako miara gęstości prawdopodobieństwa wysokości nierówności powierzchni dla stopu aluminium i stali wyniósł odpowiednio 6,84 oraz 6,56. Parametr ten stanowi najczęściej miarę liczby ostrych i wysokich szczytów lub ostrych i głębokich dolin, jakimi mogą być np. zadrapania powierzchni. Uzyskane w tym przypadku wartości parametru wyższe niż 3 (wartość 3 wskazuje na idealnie losową powierzchnię) wskazują na większą ilość stromych obszarów powierzchni.

Obróbka strumieniowo-ścierna elektrokorundem, jako jeden ze sposobów przygotowania powierzchni pod klejenie, ma za zadanie m.in. aktywację powierzchni, której celem jest zwiększenie wartości swobodnej energii powierzchniowej [121]. W związku z tym w pracy dokonano również pomiarów kąta zwilżania, które przeprowadzono przy użyciu goniometru PGX (rys. 4.7). W badaniach wykorzystano dwie ciecze pomiarowe: wodę destylowaną i diiodometan o stałej objętości 4  $\mu\text{l}$ . Ciecze nanoszono na badane powierzchnie w sposób automatyczny przez mechanizm goniometru PGX. Następnie na podstawie pomiarów kątów zwilżania oszacowano wartości swobodnej energii powierzchniowej metodą Owensa – Wendta. Metoda ta polega na określeniu składowej dyspersyjnej i polarnej SEP opierając się na hipotezie Berthelota [124]. Zgodnie z tą metodą SEP jest sumą składowej dyspersyjnej i polarnej.



Rys. 4. 7. Stanowisko do pomiaru kąta zwilżenia [opracowanie własne]

W tabeli 4.8 przedstawiono średnią wartość swobodnej energii powierzchniowej (SEP), składowej dyspersyjnej oraz polarnej SEP badanych materiałów po obróbce.

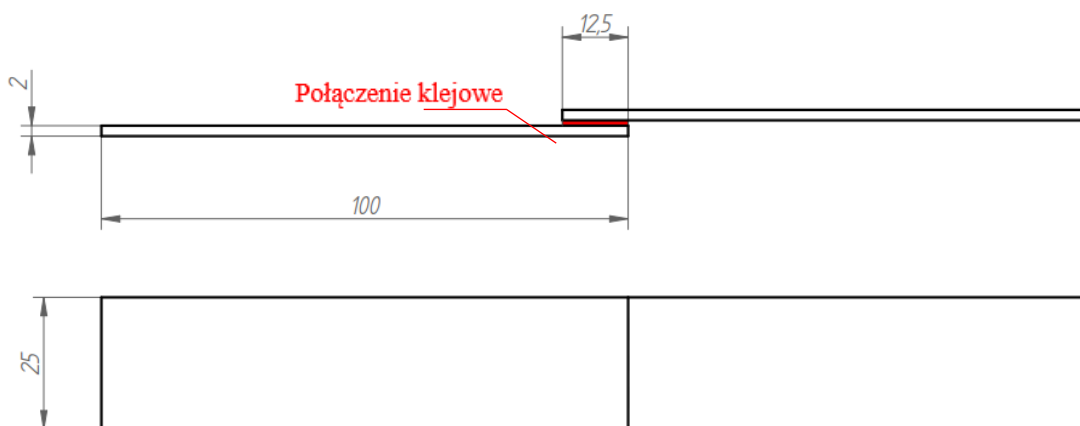
Tab. 4. 8. Średnie wartości swobodnej energii powierzchniowej dla stopu EN AW 2024-T3 oraz stali S235JR po obróbce strumieniowo-ściernej

		<b>EN AW 2024-T3</b>	<b>S235JR</b>
<b>SEP, mJ/m<sup>2</sup></b>	Średnia	45,47	49,63
	Odchylenie standardowe	0,666	0,577
<b>Dyspersyjna SEP, mJ/m<sup>2</sup></b>	Średnia	41,87	44,90
	Odchylenie standardowe	1,358	0,700
<b>Polarna SEP, mJ/m<sup>2</sup></b>	Średnia	3,57	4,73
	Odchylenie standardowe	0,902	0,723

Wartość średnia SEP po piaskowaniu dla stopu aluminium EN AW 2024-T3 wyniosła 45,47 mJ/m<sup>2</sup> z kolei dla stali S235JR 49,63 mJ/m<sup>2</sup>. Jak podaje literatura swobodna energia powierzchniowa materiałów zależy od wielu czynników, między innymi od struktury geometrycznej powierzchni [122, 123]. Hazlett w pracy [125] przedstawia poglądy innych naukowców dotyczące wpływu chropowatości powierzchni na histerezę kąta zwilżania wnioskując, że wpływ chropowatości powierzchni podczas zwilżania jest istotny.

## 4.6 Wyniki badań wytrzymałościowych dla próbek ze stali S235JR

W pierwszej kolejności przeprowadzono porównawcze badania wytrzymałości statycznej zakładkowych połączeń klejowych w wersji bazowej, bez ingerencji w geometrię zakładki, rys. 4.8, z pozostałymi badanymi próbkami dla różnych wersji ingerowania w strefę przykrawędziową.



Rys. 4. 8. Schemat jednozakładkowego połączenia klejowego w wariantcie bazowym [opracowanie własne]

Poniżej przedstawiono schematy jednozakładkowych połączeń klejowych ze zmodyfikowaną geometrią zakładki, poprzez wykonanie wcięć oraz otworów zastosowanych równocześnie dla próbek wykonanych ze stali oraz próbek wykonanych ze stopu aluminium.

Rozpatrywano warianty z modyfikacjami strefy przykrawędziowej, które polegały na wykonaniu wcięć oraz otworów przy czołowej krawędzi elementów klejonych. Warianty z modyfikacjami miały wypełnione klejem wcięcia oraz otwory, co w założeniu ma zapewnić redukcję spiętrzenia naprężeń w połączeniu. Badaniom poddano cztery następujące modyfikacje, które z kolei podzielono na różne wymiary:

- wcięcia wąskie oznaczone SWM dla próbek ze stali oraz AWM dla próbek z aluminium,
  - wcięcia średnie oznaczone SWS dla próbek stalowych oraz AWS dla próbek ze stopu aluminium,
  - wcięcia szerokie oznaczone SWD dla próbek stalowych oraz AWD dla próbek ze stopu aluminium,
  - otwory oznaczone SO dla próbek stalowych oraz AO dla próbek ze stopu aluminium.
- Badania przeprowadzono dla połączenia klejowego w wariantach z wcięciami, gdzie zmiana

geometrii strefy przykrawędziowej polegała na wykonaniu wcięć o modyfikowanej szerokości oraz zmiennej długości wynoszącej 4 mm, 3 mm, 2 mm oraz 1 mm z podziałką 6,5 mm.

W tabelach 4.9 – 4.12 zestawiono wymiary rozpatrywanych modyfikacji konstrukcyjnych elementów klejonych.

Tab. 4. 9. Wymiary zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych dla wariantu z wcięciami szerokimi

Warianty z wcięciami szerokimi (WD)			
Oznaczenia wariantów oraz wymiary wcięć			
WD1	WD2	WD3	WD4

Tab. 4. 10. Wymiary zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych dla wariantu z wcięciami średnimi  
 Warianty z wcięciami średnimi (WS)

Warianty z wcięciami średnimi (WS)			
Oznaczenia wariantów oraz wymiary wcięć			
WS1	WS2	WS3	WS4

Tab. 4. 11. Wymiary zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych dla wariantu z wcięciami wąskimi

Warianty z wcięciami wąskimi (WM)				
Oznaczenia wariantów oraz wymiary wcięć				
WM1	WM2	WM3	WM4	

Tab. 4. 12. Wymiary zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych dla wariantu z otworami

Warianty z wcięciami wąskimi (O)		
Oznaczenia wariantów oraz wymiary wcięć		
O2	O3	O4

Badania przeprowadzono po upływie 24 godzin od momentu klejenia. Pomiarów dokonano za pomocą maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell. Statyczna maszyna wytrzymałościowa przeznaczona jest do wykonywania prób wytrzymałościowych o maksymalnej sile 100 kN z ekstensometrycznym pomiarem wydłużenia. Przygotowane próbki poddano jednoosiowemu rozciąganiu. Próbki jednozakładkowych połączeń klejowych przeznaczone do badań doprowadzono do zniszczenia po uprzednim umieszczeniu ich w szczękach maszyny w sposób zaprezentowany na rysunku 4.9.



Rys. 4. 9. Położenie próbki połączenia klejowego w szczękach maszyny wytrzymałościowej [opracowanie własne]

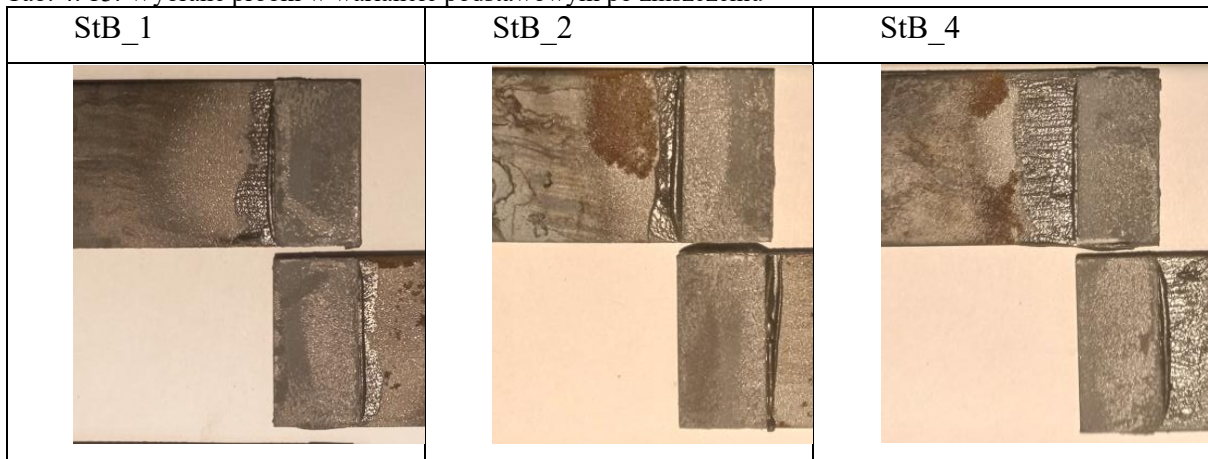
Podczas każdego z badań rejestrowano w czasie rzeczywistym aktualną wartość siły pionowej rozciągającej złącze oraz wydłużenie względne. Założono prędkość badania na poziomie 2 mm/min. Dla każdego wariantu wykonano po cztery powtórzenia.

Badania przeprowadzono w pierwszej kolejności dla próbek w wariantach bazowych oraz kolejno dla próbek ze zmienioną geometrią zakładki poprzez wykonanie wcięć o zmiennej długości i szerokości oraz dla otworów o zmiennej średnicy. Zapisane wyniki pomiarów posłużyły do dalszej analizy.

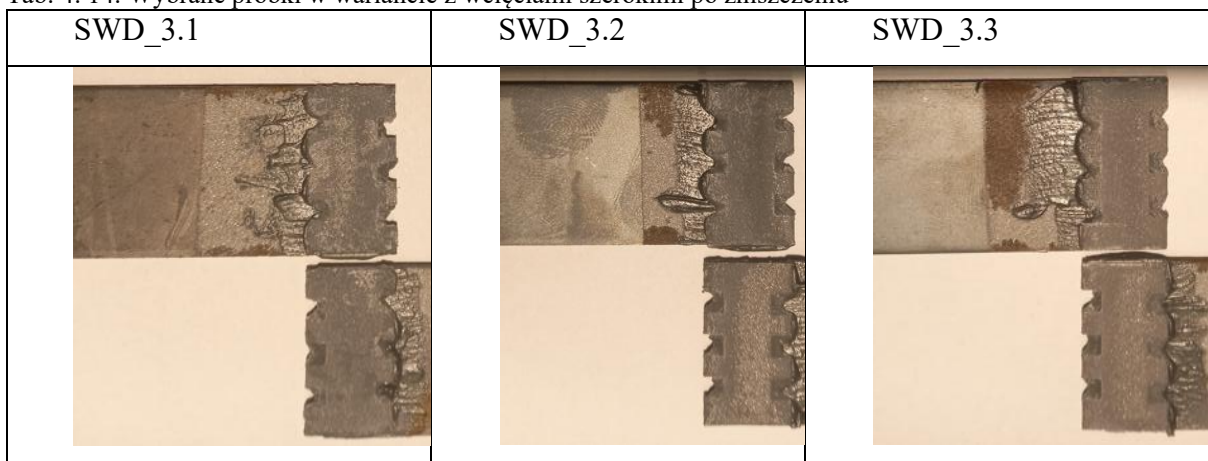
Wszystkie próbki uległy zniszczeniu w wyniku utraty przyczepności spoiny klejowej do łączonych elementów. Zniszczone próbki wykonane ze stali przedstawiono w tabelach poniżej. Każde ze złączy uległo uszkodzeniu w wyniku kohezyjnego mechanizmu zniszczenia,

zauważalne jest, że warstwa kleju pozostała na powierzchniach obu łączonych elementów. Jednak w niektórych przypadkach stwierdzono na przełomach próbek obszary o zniszczeniu adhezyjnym.

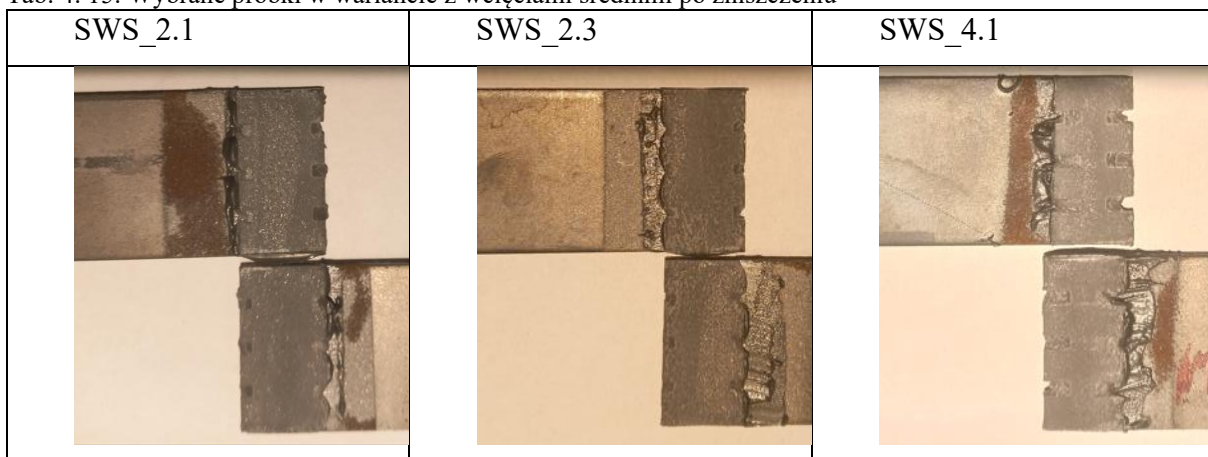
Tab. 4. 13. Wybrane próbki w wariacie podstawowym po zniszczeniu



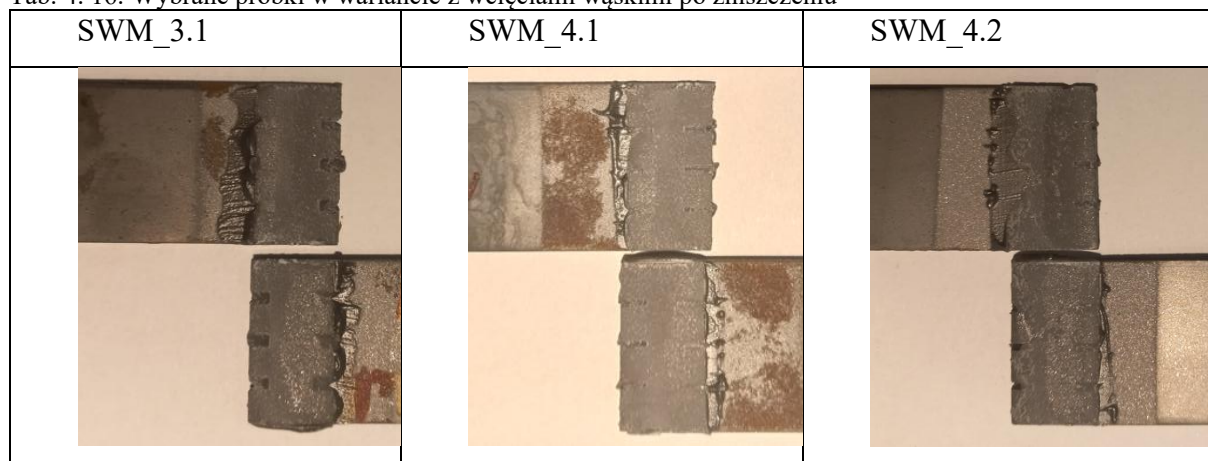
Tab. 4. 14. Wybrane próbki w wariacie z wcięciami szerokimi po zniszczeniu



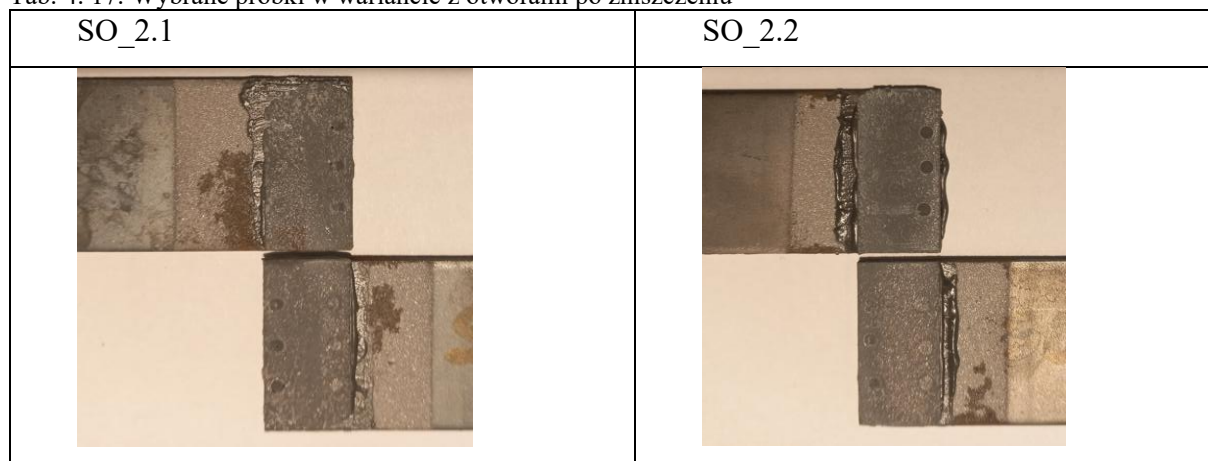
Tab. 4. 15. Wybrane próbki w wariacie z wcięciami średnimi po zniszczeniu



Tab. 4. 16. Wybrane próbki w wariacie z wcięciami wąskimi po zniszczeniu



Tab. 4. 17. Wybrane próbki w wariacie z otworami po zniszczeniu



Analiza wyników badań wytrzymałości statycznej polegała na określeniu wartości siły niszczącej złącze. Zgromadzone dane pozwoliły na określenie maksymalnych naprężeń ścinających występujących w spoinie. Naprężenia te wyznaczono na podstawie następującego wzoru:

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{A_z} \quad (1.51)$$

gdzie:

$\tau_{max}$  [MPa] – maksymalne naprężenia ścinające występujące w spoinie,

$P_{max}$  [N] – maksymalna siła rozciągająca próbkę,

$A_z$  [mm<sup>2</sup>] – powierzchnia zakładki.

Zależność tą stworzono na podstawie wzoru (2.2) dla naprężeń ścinających w spoinie klejowej po zmodyfikowaniu go przez wyliczenie pola powierzchni spoiny. Wartości określono

na podstawie pomiarów próbek przygotowanych do badania, dla geometrii zakładki o wymiarach 25 mm x 12,5 mm.

Wyniki obliczeń z wykonanych prób przedstawiono w tabelach, gdzie:

$P$  [N] – wartość nośności połączenia klejowego,

$P_{sr}$  [N] – wartość średnia nośności próbek,

$\sigma_P, \sigma_{Rt}$  [N] – odchylenie standardowe,

$R_t$  [MPa] – wytrzymałość na ścinanie,

$R_{t,sr}$  [MPa] – wartość średnia wytrzymałości na ścinanie.

Tab. 4. 18. Tabela wyników dla wariantu bazowego

Próba nr	Oznaczenie próbki	Nośność połączenia $P$ [N]	Średnia wartość nośności $P_{sr}$ [N]	Odchylenie standardowe $\sigma_P$ [N]	Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie $R_{t,sr}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rt}$ [MPa]
1	StB_1	7729,44	7607,96	321,311	24,73	24,34	1,028
2	StB_2	7608,99			24,34		
3	StB_3	7399,95			23,67		
4	StB_4	7851,40			25,12		
5	StB_5	8291,62			26,53		
6	StB_6	7261,45			23,23		
7	StB_7	7361,24			23,55		
8	StB_8	7635,01			24,43		
9	StB_9	7132,53			22,82		
10	StB_10	7808,01			24,98		

Tab. 4. 19. Tabela wyników badań próbek ze stali dla wariantu pierwszego z wcięciami szerokimi o szerokości 3 mm (wariant SWD)

Próba nr	Oznaczenie próbki	Nośność połączenia P [N]	Średnia wartość nośności $P_{sr}$ [N]	Odchylenie standardowe $\sigma_P$ [N]	Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie $R_{t,śr}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rt}$ [MPa]
1	SWD_1.1	9255,50	8634,04	367,412	29,61	27,62	1,172
2	SWD_1.2	8354,73			26,73		
3	SWD_1.3	8666,33			27,73		
4	SWD_1.4	8494,53			27,18		
5	SWD_1.5	8399,03			26,87		
6	SWD_2.1	7759,58	7601,64	466,149	24,83	24,32	1,491
7	SWD_2.2	8269,38			26,46		
8	SWD_2.3	7008,81			22,42		
9	SWD_2.4	7384,91			23,63		
10	SWD_2.5	7585,49			24,26		
11	SWD_3.1	8953,87	8534,29	353,790	28,65	27,30	1,131
12	SWD_3.2	8797,56			28,15		
13	SWD_3.3	8239,0			26,36		
14	SWD_3.4	8124,79			25,99		
15	SWD_3.5	8556,13			27,37		
16	SWD_4.1	7419,23	7618,92	358,731	23,74	24,38	1,152
17	SWD_4.2	7125,06			22,81		
18	SWD_4.3	8032,08			25,72		
19	SWD_4.4	7856,50			25,13		
20	SWD_4.5	7656,72			24,49		

Tab. 4. 20. Tabela wyników badań dla próbek ze stali w wariacie drugim z wcięciami średnimi o szerokości 2 mm (wariant: SWS)

Próba nr	Oznaczenie próbki	Nośność połączenia P [N]	Średnia wartość nośności $P_{sr}$ [N]	Odchylenie standardowe $\sigma_p$ [N]	Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie $R_{t,śr}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rt}$ [MPa]
1	SWS_1.1	6919,75	7651,92	540,84	22,14	24,48	1,730
2	SWS_1.2	8230,12			26,33		
3	SWS_1.3	7304,87			23,37		
4	SWS_1.4	7738,55			24,76		
5	SWS_1.5	8066,30			25,80		
6	SWS_2.1	6767,54	7413,35	406,950	21,65	23,72	1,300
7	SWS_2.2	7280,55			23,29		
8	SWS_2.3	7715,95			24,69		
9	SWS_2.4	7758,31			24,82		
10	SWS_2.5	7544,41			24,13		
11	SWS_3.1	6497,91	7612,44	657,730	20,79	24,36	2,110
12	SWS_3.2	7606,06			24,33		
13	SWS_3.3	8197,58			26,23		
14	SWS_3.4	7846,43			25,11		
15	SWS_3.5	7914,21			25,32		
16	SWS_4.1	8458,18	8249,43	154,90	27,06	26,43	0,500
17	SWS_4.2	8114,71			25,96		
18	SWS_4.3	8092,01			25,89		
19	SWS_4.4	8296,37			26,54		
20	SWS_4.5	8345,87			26,70		

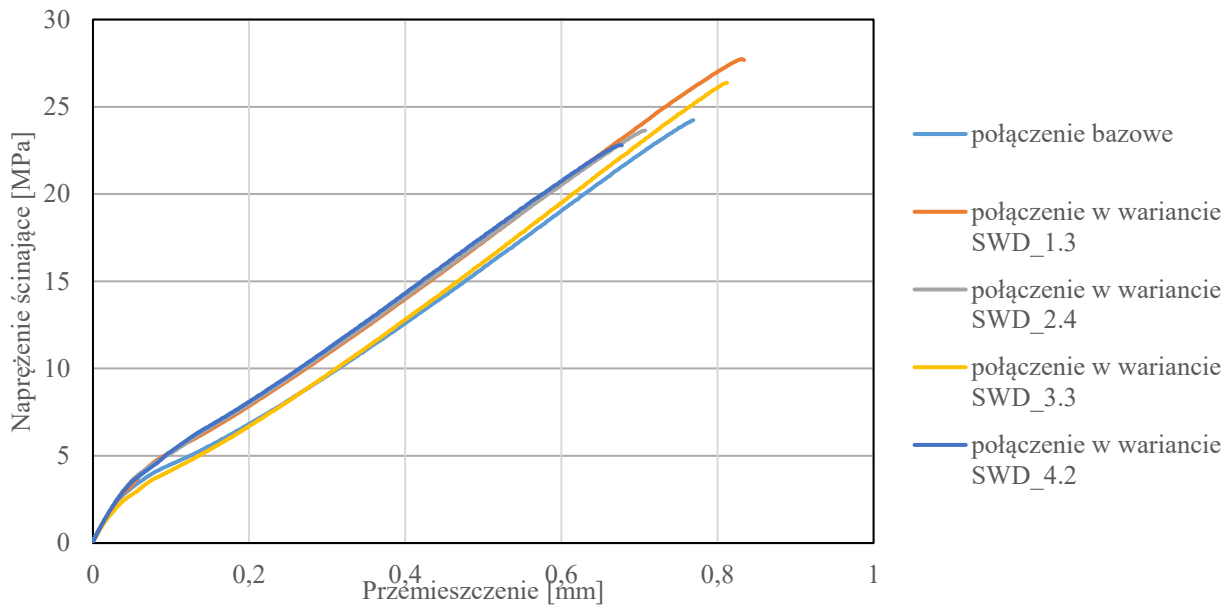
Tab. 4. 21. Tabela wyników badań dla wariantu trzeciego z wcięciami wąskimi o szerokości 1 mm (wariant: SWM) próbek ze stali

Próba nr	Oznaczenie próbki	Nośność połączenia P [N]	Średnia wartość nośności $P_{sr}$ [N]	Odchylenie standardowe $\sigma_P$ [N]	Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie $R_{t,śr}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rt}$ [MPa]
1	SWM_1.1	7893,75	7834,13	68,895	25,26	25,07	0,221
2	SWM_1.2	7872,69			25,19		
3	SWM_1.3	7722,26			24,71		
4	SWM_1.4	7866,78			25,17		
5	SWM_1.5	7815,15			25,00		
6	SWM_2.1	6923,23	6875,80	596,251	22,15	22,00	1,912
7	SWM_2.2	6326,01			20,24		
8	SWM_2.3	7776,86			24,88		
9	SWM_2.4	6340,17			20,28		
10	SWM_2.5	7012,71			22,43		
11	SWM_3.1	6559,14	7503,09	582,443	20,98	24,01	1,872
12	SWM_3.2	7880,16			25,21		
13	SWM_3.3	7331,91			23,46		
14	SWM_3.4	7976,56			25,52		
15	SWM_3.5	7769,91			24,86		
16	SWM_4.1	6257,53	7190,79	539,301	20,02	23,00	1,721
17	SWM_4.2	7226,81			23,12		
18	SWM_4.3	7598,09			24,31		
19	SWM_4.4	7486,71			23,95		
20	SWM_4.5	7384,79			23,62		

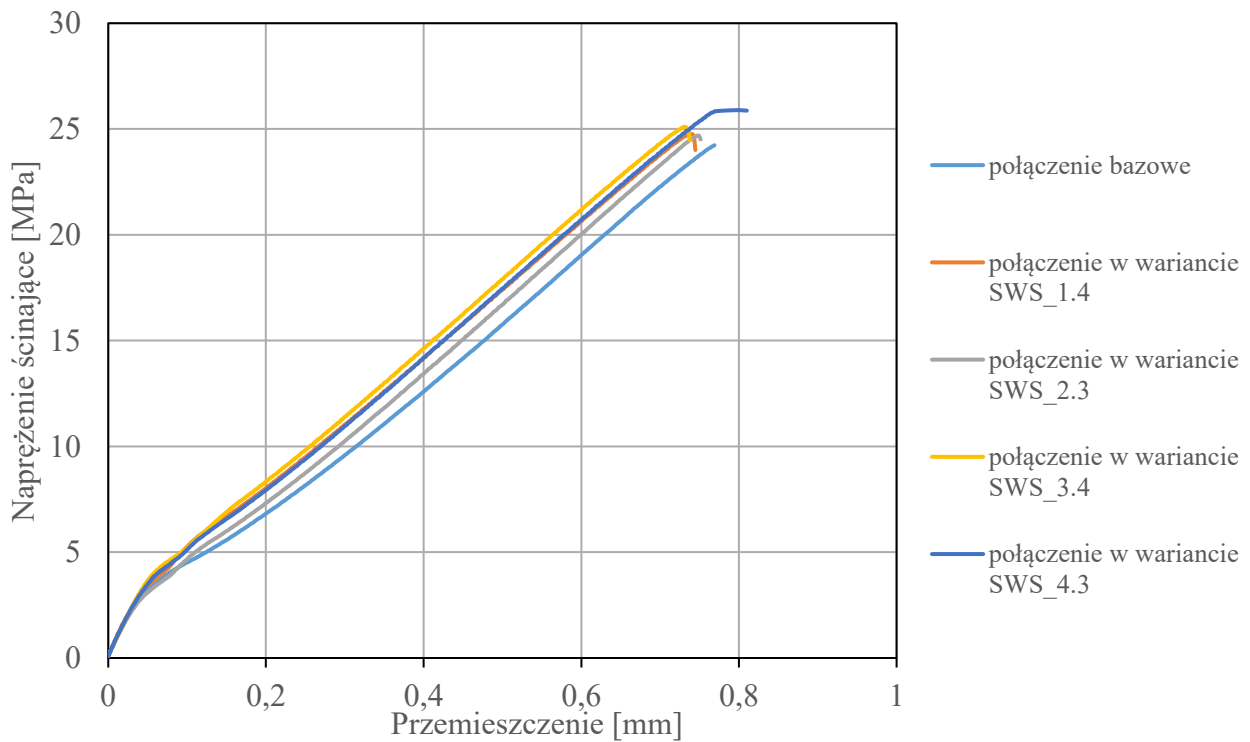
Tab. 4. 22. Tabela wyników badań próbek połączeń ze stali dla wariantu z otworami (wariant: SO)

Próba nr	Oznaczenie próbki	Nośność połączenia P [N]	Średnia wartość nośności $P_{\text{sr}}$ [N]	Odchylenie standardowe $\sigma_P$ [N]	Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie $R_{t,\text{sr}}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rt}$ [MPa]
1	SO_2.1	7638,35	7332,05	348,02	24,44	23,46	1,11
2	SO_2.2	7090,81			22,69		
3	SO_2.3	7590,12			24,28		
4	SO_2.4	6847,93			21,91		
5	SO_2.5	7493,03			23,98		
6	SO_3.1	7567,29	7033,12	1098,94	24,21	22,50	3,52
7	SO_3.2	7503,32			24,01		
8	SO_3.3	7633,82			24,42		
9	SO_3.4	5074,02			16,23		
10	SO_3.5	7387,14			23,64		
11	SO_4.1	7591,52	7368,93	242,56	24,29	23,58	0,78
12	SO_4.2	7556,71			24,18		
13	SO_4.3	7027,06			22,48		
14	SO_4.4	7459,77			23,87		
15	SO_4.5	7209,55			23,07		

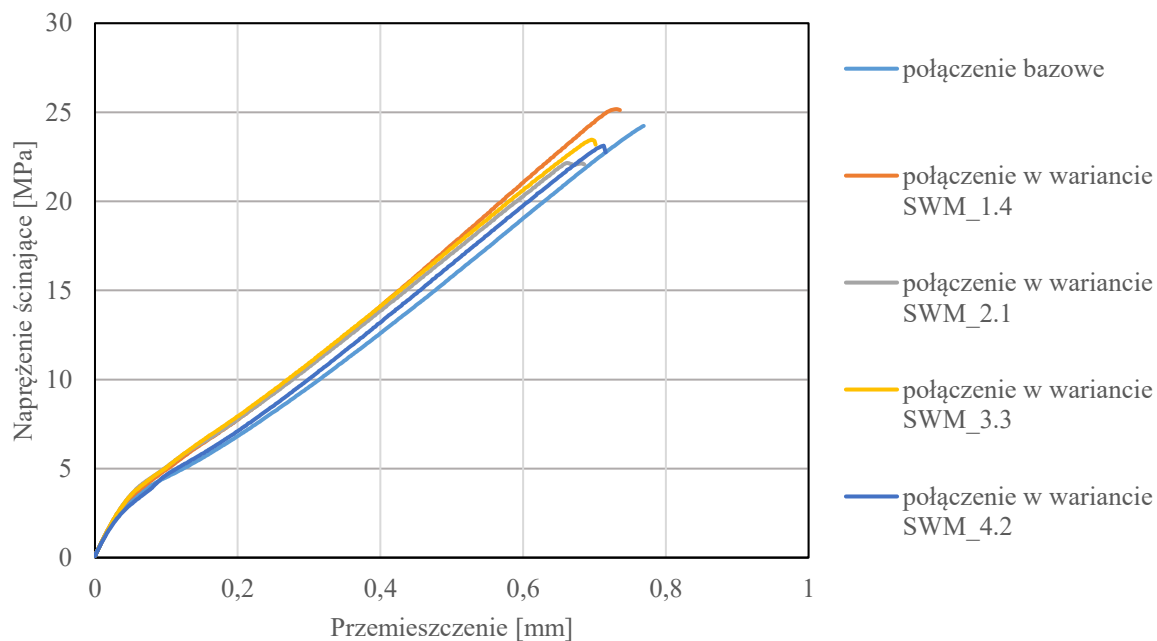
Na wstępie przeprowadzono porównawcze badania wytrzymałości statycznej połączeń w wersji bazowej oraz połączeń z modyfikacjami, poprzez wykonanie wcięć oraz otworów. Na podstawie pozyskanych danych i wyliczeń przygotowano wykresy obrazujące zależność naprężeń ścinających występujących w spoinie w poszczególnych wariantach. Reprezentacyjne krzywe naprężenia ścinającego i przemieszczenia uzyskane w ramach przeprowadzonych badań wytrzymałości statycznej na ścinanie przedstawiono na rysunkach 4.10 – 4.13.



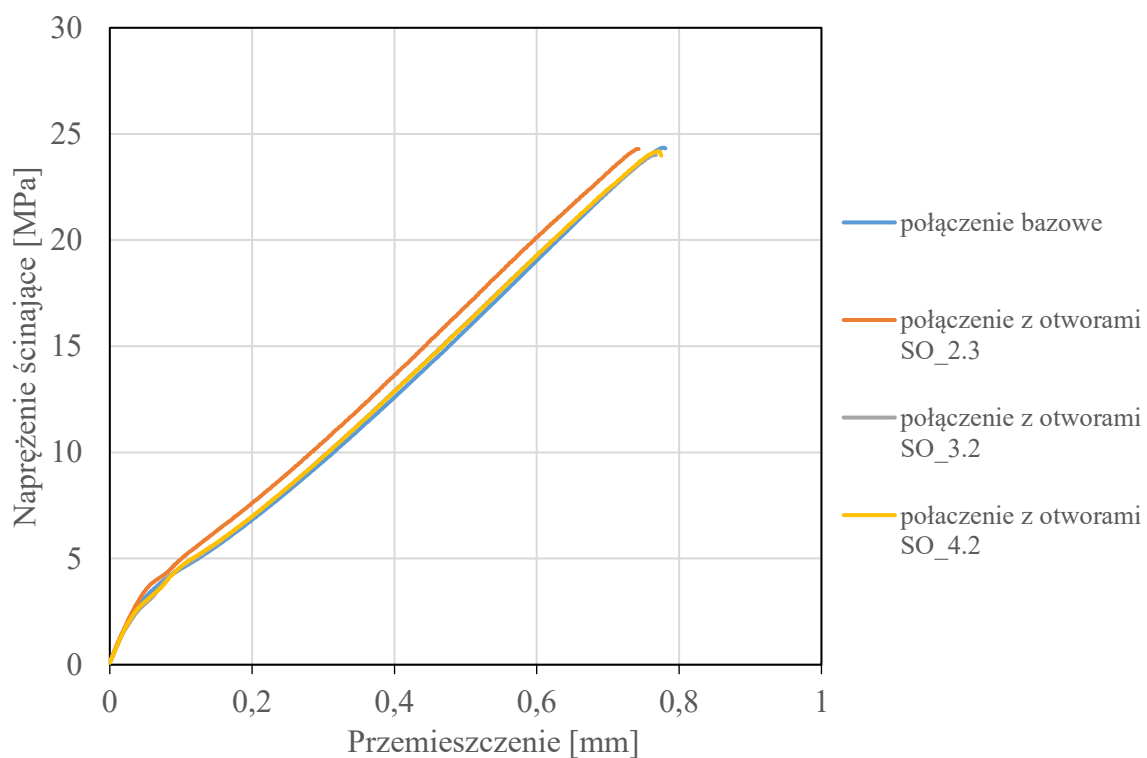
Rys. 4. 10. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariantie SWD, szerokość 3 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne]



Rys. 4. 11. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariantie SWS, szerokość 2 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne]



Rys. 4. 12. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariacie SWM, szerokość 1 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne]



Rys. 4. 13. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z otworami w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne]

Na podstawie przedstawionych danych zaobserwowano, że zakładkowe połączenia klejowe z wcięciami w strefie przykrawędziowej cechują się nieznacznie większą sztywnością niżeli zakładkowe połączenia klejowe w wersji bazowej. Wykazano tym wzrost nośności w przypadku połączeń, które mają zmienioną geometrię zakładki poprzez wykonane wcięcia. W wariancie pierwszym dla geometrii wcięcia o szerokości 3 mm, długości 1 mm średnia wartość nośności z wariantu bazowego wynosząca 7607,96 N wzrosła do wartości 8634,04 N, co za tym idzie wzrosła wytrzymałość złącza do wartości 27,62 MPa co stanowi ponad 12% więcej i można to zaobserwować na rysunku 4.10 przedstawiającym reprezentatywne krzywe dla tego przypadku. W przypadku wcięcia o wymiarach: szerokość 3 mm, długość 3 mm średnia wartość nośności też znacznie wzrosła. Jej wartość to 8534,29 N, stanowiąca ponad 10 % wzrostu, tym samym zwiększyła się wytrzymałość na ścianie dla tej modyfikacji. W pozostałych przypadkach wcięć typu SWD uzyskano mniejsze wyniki nośności połączeń klejowych.

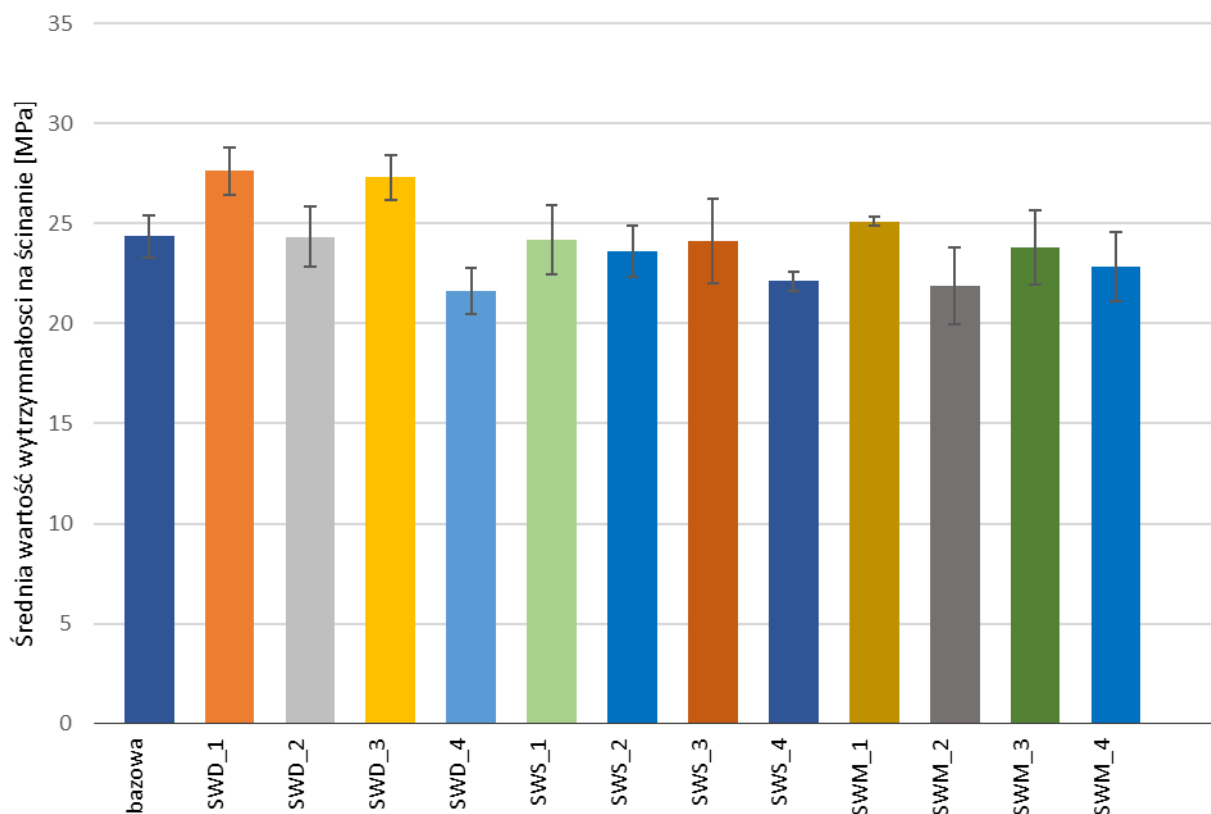
W wariancie drugim rozważnej geometrii o szerokości 2 mm wartość średnia nośności dla pięciu powtórzeń przy długości 1 mm wyniosła 7651,92 N w przypadku tego połączenia klejowego, a w wariancie bazowym wynosiła 7607,96 N. Daje to nieznacznie większy wynik mimo, iż jedna z prób miała wartość równą 8230,12 N, co można zaobserwować na wykresie reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego. Zjawisko to potwierdza występowanie znacznych rozrzutów pomiędzy wynikami dla poszczególnych prób. Na tej podstawie można stwierdzić, że nie wszystkie próbki zostały należycie dopracowane podczas przygotowania powierzchni albo, że nie zawsze udało się równomiernie wypełnić wcięcia. Podsumowując rozpatrywane przypadki dla wariantu drugiego o wcięciach o szerokości 2 mm daje to najlepszy średni wynik dla tego typu modyfikacji. Drugim niewiele mniejszym jest średnia wartość nośności 7612,44 N dla wymiarów: szerokość 2 mm, długość 3 mm. Oba te warianty mają wyższy wynik średniej wytrzymałości, ale także tylko dla wybranej próby SWS\_2.3 i SWS\_3.4 o czym świadczą reprezentatywne krzywe przedstawione na rysunku 4.11, które wynoszą 24,69 MPa i 25,11 MPa. Wyniki te stanowią zaledwie ok. 1 % wzrost biorąc pod uwagę te jednostkowe przypadki.

Analiza statyczna trzeciego wariantu modyfikacji konstrukcyjnej polegająca na wykonanych wcięciach o szerokości 1 mm wykazała, że średnia wartość nośności dla wymiaru długości 1 mm była najlepsza, 7834,13 N. Dla takiego wcięcia średnia wartość wytrzymałości złącza wynosi 25,07 MPa, co stanowi wzrost od wariantu bazowego o ponad 3%, co można

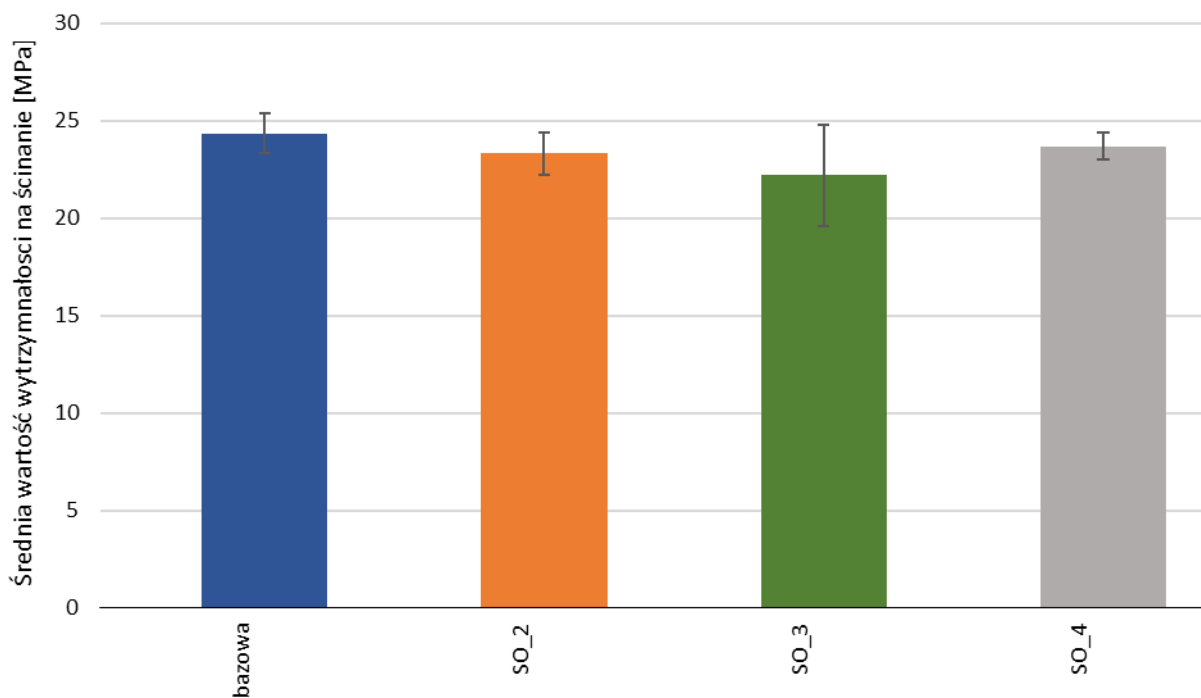
zaobserwować na wykresie reprezentatywnych krzywych dla tego wariantu, rys. 4.12. Dla pozostałych wersji zanotowano słabsze wyniki. Niemniej jednak tak jak w przypadkach przedstawionych powyżej dla modyfikacji, w której wymiary wynoszą szerokość 1 mm, długość 3 mm można zauważyć także znaczącą poprawę nośności w porównaniu z wariantem bazowym. Na przykładzie próby SWM\_3.4 dla której wartość naprężenia ścinającego wyniosła 25,52 MPa natomiast w pozostałych przypadkach porównując średnie wartości nośność jest na poziomie 7503,09 N, a średnia wartość wytrzymałości na ścinanie wynosi 24,01 MPa. Należy tutaj jednak zaznaczyć że średnia wartość liczona z pięciu wykonanych prób nie jest miarodajna, gdyż widać z wyników iż jedna z prób dała bardzo słaby wynik, 6559,14 N zaniżając tym samym średnią.

Badania przeprowadzone dla wersji z otworami wykazały wzrost nośności połączenia klejowego od wersji bazowej największe dla otworów  $\phi$  4 mm. Na podstawie wyników z wykonanych prób, trzy na pięć prób miały zbliżone wyniki dające ogólnie dobrą wartość nośności tychże połączeń wynoszącą dla reprezentatywnej krzywej SO\_4.2 7556,71 N pokazanej na rysunku 4.13. Jednakże biorąc pod uwagę całą serię wykonanych prób średnia wartość wytrzymałości na ścinanie wynosi 23,58 MPa, gdzie jedna z prób dała wynik równy 24,29 MPa. Z przedstawionych na rysunku 4.13, reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia dla tej modyfikacji z otworami zaobserwowano także wysoką wartość dla próby z modyfikacją gdzie otwory były równe  $\phi$  2 mm. Próba SO\_2.3 wyróżnia się znaczną wartością nośności równą 7590,12 N, co za tym idzie wartość wytrzymałości na ścinanie wynosi 24,28 MPa i jest bardzo zbliżona do wartości dla porównywanego wariantu bazowego.

Na wykresach poniżej przedstawiono porównanie średnich wartości wytrzymałości złącza klejowego na ścinanie, porównując wariant bazowy z wariantami z modyfikowanymi wcięciami (rys. 4.14) oraz porównując wariant bazowy z wariantami, w których modyfikacja polegała na wykonaniu otworów (rys. 4.15). Dla wariantu z otworami na czołowych krawędziach łączonych elementów odchylenie standardowe dla otworów  $\phi$  4 mm wynosiło 0,78 MPa, natomiast warianty z wcięciami charakteryzowały się znacznie rozproszonymi wynikami. z kolei dla wariantu SWS odnotowano wartość odchylenia standardowego na poziomie 1,41 MPa, gdy dla wariantu podstawowego odchylenie standardowe wynosiło 0,261 MPa.



Rys. 4. 14. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ścinanie dla rozpatrywanych wariantów z wcięciami próbek ze stali [opracowanie własne]



Rys. 4. 15. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ścinanie dla rozpatrywanych wariantów z otworami dla próbek stalowych [opracowanie własne]

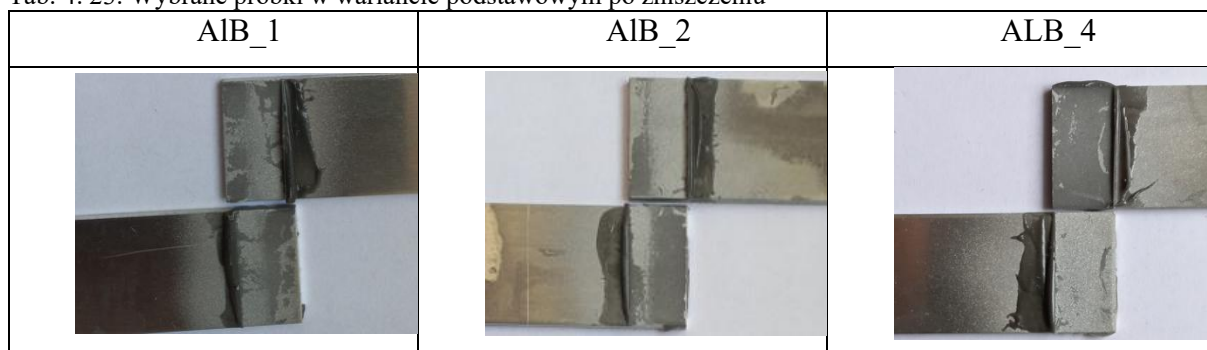
Należy jednak zaznaczyć, że warianty ze zmienioną geometrią w strefie przykrawędziowej charakteryzują się znacznym rozproszeniem wyników w porównaniu z wersją podstawową. Wykazany przyrost nośności połączeń klejowych z modyfikacjami konstrukcyjnymi jest obarczony błędem, występujące ponad dwukrotne większe wartości odchylenia standardowego świadczące o niższej powtarzalności. Większy rozrzut wyników badań wytrzymałości może wpływać na nierównomierne wypełnienie wcięć klejem. Ponadto, klej wypełniający przestrzeń wcięć może zawierać w swojej objętości losowe defekty, takie jak: pęcherze powietrzne, co także może przyczyniać się do rozrzutów wyników.

#### 4.7 Wyniki badań wytrzymałościowych dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024 T3


Badaniom wytrzymałościowym poddano również próbki wykonane ze stopu aluminium w tych samych wariantach, tj. w wersji bazowej oraz ze zmienioną geometrią w strefie przykrawędziowej z wcięciami i otworami. Badania wykonano na tej samej zasadzie przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Zwick, umieszczając próbkę w szczękach według schematu, rys. 4.9. Założono prędkość pomiaru równą 2 mm/min. Podczas badania każdej próbki również rejestrowano w czasie rzeczywistym aktualną wartość siły pionowej rozciągającej złącze oraz wydłużenie względne. Dla każdego z wariantów wykonano po pięć powtórzeń.

Tak samo jak w przypadku badań próbek stalowych wszystkie próbki ze stopu aluminium uległy zniszczeniu w wyniku utraty przyczepności spoiny klejowej do łączonych elementów. Zniszczone próbki wykonane ze stopu aluminium przedstawiono w tabelach poniżej.

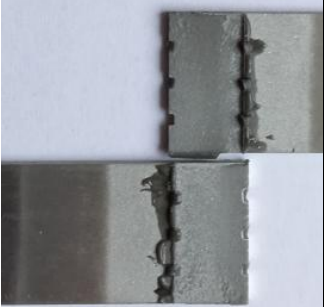
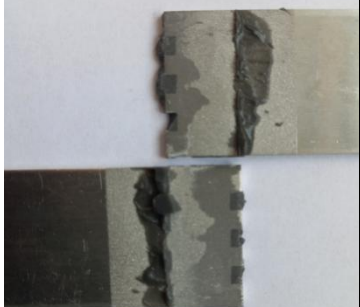
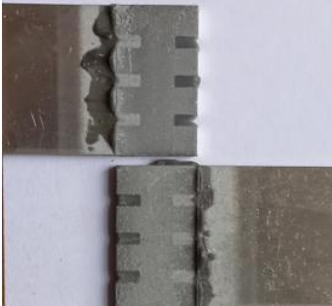
Tab. 4. 23. Wybrane próbki w wariantcie podstawowym po zniszczeniu




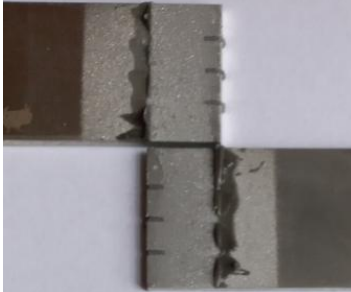
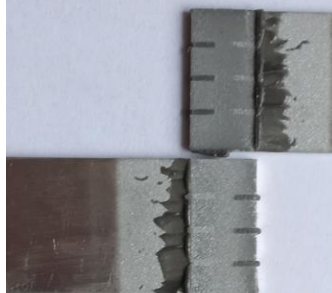
Tab. 4. 24 Wybrane próbki w wariacie z wcięciami szerokimi po zniszczeniu

AWD_3.1	AWD_3.2	AWD_4.1
		

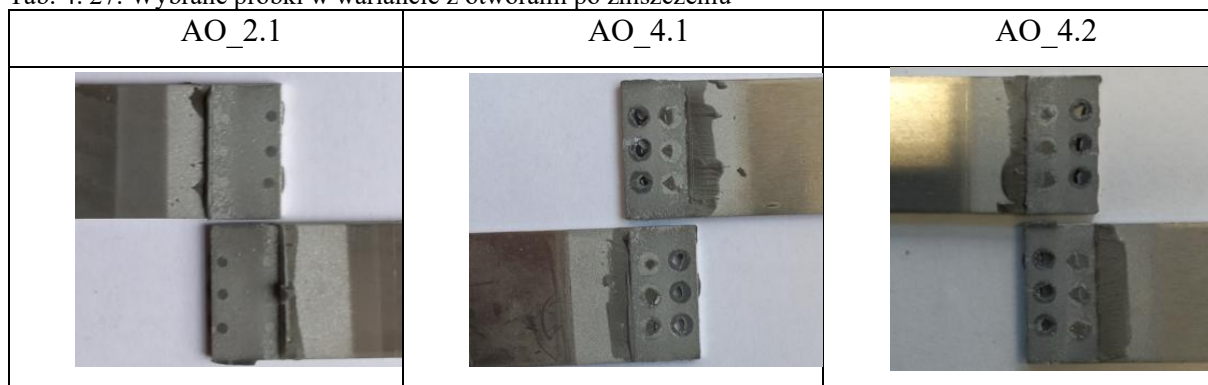
Tab. 4. 25. Wybrane próbki w wariacie z wcięciami średnimi po zniszczeniu

AWS_1.2	AWS_3.1	AWS_4.3
		

Tab. 4. 26. Wybrane próbki w wariacie z wcięciami wąskimi po zniszczeniu

AWM_1.1	AWM_3.3	AWM_4.2
		

Tab. 4. 27. Wybrane próbki w wariacie z otworami po zniszczeniu



Na podstawie zebranych danych, podobnie jak w przypadku dla próbek ze stali, zostały zestawione dane sił i przeprowadzone obliczenia naprężeń ścinających występujących w spoinie. Otrzymane wyniki z obliczeń według zależności (1.51) zostały zaprezentowane w tabelach poniżej dla wszystkich wariantów badanych próbek dla stopu aluminium EN AW-2024-T3.

Tab. 4. 28. Wyniki badań dla wariantu bazowego

Próba nr	Oznaczenie próbki	Nośność połączenia P [N]	Średnia wartość nośności $P_{sr}$ [N]	Odchylenie standardowe $\sigma_P$ [N]	Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie $R_{t,sr}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rt}$ [MPa]
1	AB_1	5889,97	5887,21	169,52	18,84	18,83	0,54
2	AB_2	6002,79			19,21		
3	AB_3	5637,75			18,04		
4	AB_4	5787,13			18,51		
5	AB_5	6176,14			19,76		
6	AB_6	5829,49			18,65		

Tab. 4. 29 Wyniki badań dla próbek ze stopu aluminium wariantu pierwszego z wcięciami o szerokości 3 mm (wariant: AWD)

Próba nr	Oznaczenie próbki	Nośność połączenia P [N]	Średnia wartość nośności $P_{sr}$ [N]	Odchylenie standardowe $\sigma_P$ [N]	Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie $R_{t,śr}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rt}$ [MPa]
1	AWD_1.1	5245,29	5420,14	484,04	16,78	17,34	1,55
2	AWD_1.2	5275,44			16,88		
3	AWD_1.3	6257,23			20,02		
4	AWD_1.4	5001,66			16,01		
5	AWD_1.5	5321,08			17,03		
6	AWD_2.1	5549,95	5827,67	267,16	17,75	18,65	0,85
7	AWD_2.2	5596,01			17,92		
8	AWD_2.3	6185,04			19,79		
9	AWD_2.4	5815,81			18,61		
10	AWD_2.5	5991,52			19,17		
11	AWD_3.1	5296,82	5623,62	443,36	16,94	17,99	1,42
12	AWD_3.2	5721,41			18,31		
13	AWD_3.3	5069,41			16,22		
14	AWD_3.4	6182,62			19,78		
15	AWD_3.5	5847,86			18,71		
16	AWD_4.1	5313,34	5393,89	186,07	17,02	17,26	0,59
17	AWD_4.2	5528,22			17,69		
18	AWD_4.3	5102,01			16,32		
19	AWD_4.4	5527,33			17,68		
20	AWD_4.5	5498,58			17,59		

Tab. 4. 30. Wyniki badań dla próbek ze stopu aluminium w wariancie drugim z wcięciami średnimi o szerokości 2 mm (wariant: AWS)

Próba nr	Oznaczenie próbki	Nośność połączenia P [N]	Średnia wartość nośności $P_{sr}$ [N]	Odchylenie standardowe $\sigma_P$ [N]	Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie $R_{t,śr}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rt}$ [MPa]
1	AWS_1.1	6153,25	6254,54	79,94	19,69	20,01	0,255
2	AWS_1.2	6204,36			19,85		
3	AWS_1.3	6354,52			20,33		
4	AWS_1.4	6307,33			20,18		
5	AWS_1.5	6253,23			20,01		
6	AWS_2.1	6301,45	6402,04	222,07	20,16	20,48	0,71
7	AWS_2.2	6738,62			21,56		
8	AWS_2.3	6479,54			20,73		
9	AWS_2.4	6148,58			19,67		
10	AWS_2.5	6341,98			20,29		
11	AWS_3.1	5976,12	5957,37	31,44	19,12	19,06	0,10
12	AWS_3.2	5999,51			19,19		
13	AWS_3.3	5921,24			18,94		
14	AWS_3.4	5955,31			19,05		
15	AWS_3.5	5934,63			18,99		
16	AWS_4.1	5498,15	5656,96	213,60	17,59	18,10	0,68
17	AWS_4.2	5373,48			17,19		
18	AWS_4.3	5752,08			18,41		
19	AWS_4.4	5892,24			18,85		
20	AWS_4.5	5768,85			18,46		

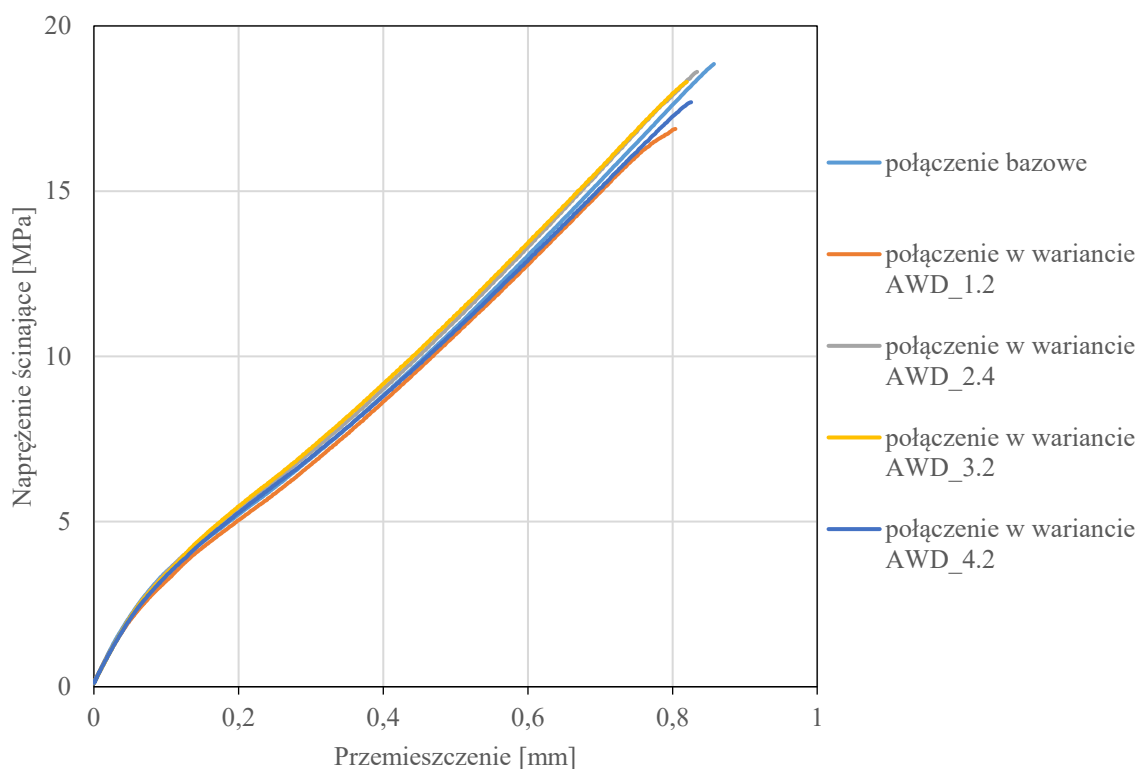
Tab. 4. 31. Wyniki badań dla próbek ze stopu aluminium w wariancie trzecim z wcięciami wąskimi o szerokości 1 mm (wariant: AWM)

Próba nr	Oznaczenie próbki	Nośność połączenia P [N]	Średnia wartość nośności $P_{sr}$ [N]	Odchylenie standardowe $\sigma_P$ [N]	Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie $R_{t,śr}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rt}$ [MPa]
1	AWM_1.1	5975,92	5811,35	242,24	19,12	18,59	0,77
2	AWM_1.2	5384,86			17,23		
3	AWM_1.3	5930,94			18,97		
4	AWM_1.4	5856,87			18,74		
5	AWM_1.5	5908,15			18,91		
6	AWM_2.1	5743,09	5660,41	136,85	18,37	18,11	0,44
7	AWM_2.2	5548,34			17,75		
8	AWM_2.3	5805,48			18,57		
9	AWM_2.4	5484,72			17,55		
10	AWM_2.5	5720,40			18,31		
11	AWM_3.1	5822,82	5740,99	200,64	18,63	18,37	0,64
12	AWM_3.2	5507,69			17,62		
13	AWM_3.3	5635,90			18,03		
14	AWM_3.4	6036,52			19,31		
15	AWM_3.5	5701,99			18,25		
16	AWM_4.1	5487,21	5605,98	195,24	17,55	17,93	0,63
17	AWM_4.2	5570,75			17,82		
18	AWM_4.3	5364,40			17,16		
19	AWM_4.4	5819,92			18,62		
20	AWM_4.5	5787,61			18,52		

Tab. 4. 32. Wyniki badań dla próbek ze stopu aluminium w wariacie z otworami (wariant: AIO)

Próba nr	Oznaczenie próbki	Nośność połączenia P [N]	Średnia wartość nośności $P_{sr}$ [N]	Odchylenie standardowe $\sigma_P$ [N]	Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie $R_{t,sr}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rt}$ [MPa]
1	AO_2.1	5761,51	5787,80	166,85	18,43	18,52	0,53
2	AO_2.2	5989,29			19,16		
3	AO_2.3	5532,65			17,71		
4	AO_2.4	5798,09			18,55		
5	AO_2.5	5857,46			18,74		
6	AO_3.1	5589,13	5467,35	92,17	17,88	17,49	0,30
7	AO_3.2	5441,33			17,41		
8	AO_3.3	5399,23			17,27		
9	AO_3.4	5371,51			17,18		
10	AO_3.5	5535,53			17,71		
11	AO_4.1	4929,13	4974,61	80,03	15,77	15,92	0,26
12	AO_4.2	5004,82			16,01		
13	AO_4.3	4934,47			15,79		
14	AO_4.4	5101,02			16,32		
15	AO_4.5	4903,58			15,69		

Podobnie jak w przypadku badań wytrzymałości statycznej dla próbek ze stali postąpiono z próbkami ze stopu aluminium. Przeprowadzono porównawcze badania wytrzymałości statycznej połączeń w wersji bazowej oraz połączeń z modyfikacjami. Na podstawie uzyskanych danych przygotowano wykresy obrazujące zależność naprężeń ścinających występujących w spoinie w poszczególnych wariantach. Reprezentacyjne krzywe naprężenia ścinającego i przemieszczenia uzyskane w ramach przeprowadzonych badań wytrzymałości statycznej na ścinanie przedstawiono na rysunkach 4.16 – 4.19.

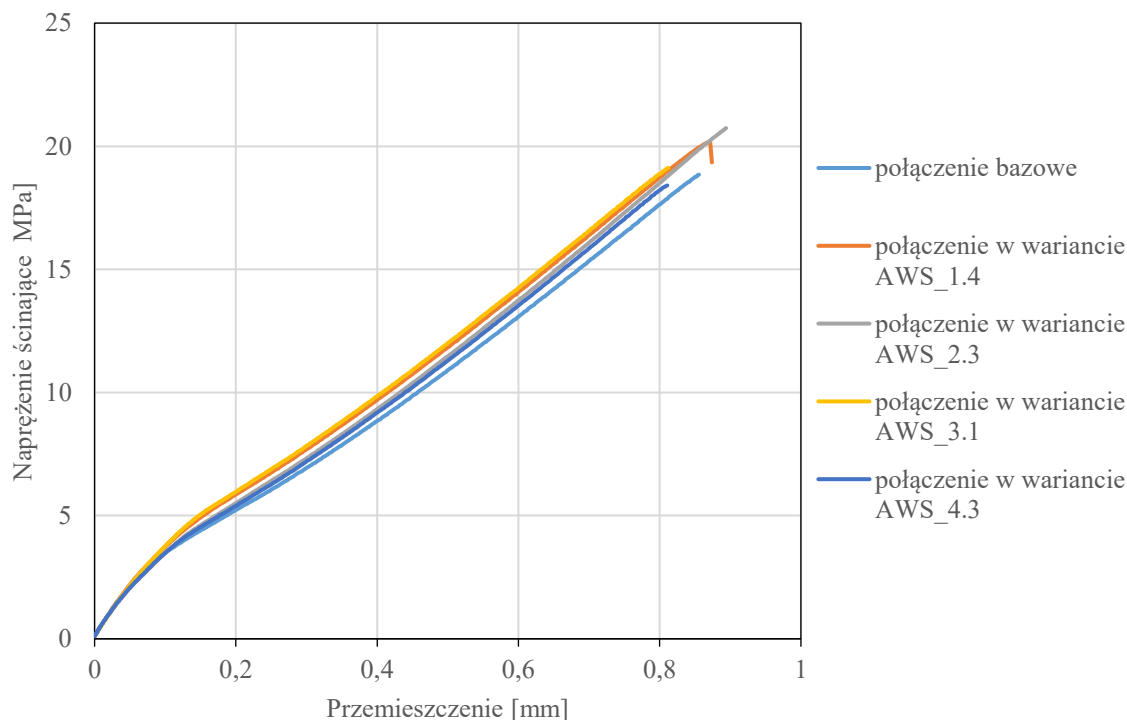


Rys. 4. 16. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariacie AWD, szerokość 3 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne]

Interpretując wyniki badań wytrzymałości statycznej dla badanych próbek ze stopu aluminium zaobserwowano, że jednozakładowe połączenia klejowe z wprowadzonymi modyfikacjami konstrukcyjnymi na krawędzi czołowej zakładki cechują się nieznacznie większą sztywnością niż połączenia klejowe w wersji bazowej. Wykazano wzrost nośności połączenia w przypadkach wariantów ze zmienioną geometrią w strefie przykrawędziowej a tym także wzrost wytrzymałości badanego złącza. Dla pierwszego wariantu gdzie zmianą geometrii były wcięcia szerokie, 3 mm, średnia wartość nośności dla próbek o długości 2 mm była największa, wyniosła 5827,67 N. Stanowi to niewielką różnicę do nośności dla wariantu bazowego, która jest równa 5887,21 N. Na wykresie przedstawiającym reprezentatywne krzywe dla tego wariantu, rys. 4.16, przedstawiono próbę AWD\_2.4, której wartość wytrzymałości na ścinanie wynosi 18,61 MPa, co stanowi różnicę przyrostu do wariantu bazowego o ok. 1 %. Dla pozostałych przypadków wariantu z wcięciami szerokimi, a zmiennej długości wartości średniej wytrzymałości na ścinanie były bardzo zbliżone. Niemniej jednak należy zwrócić uwagę na przypadek w wariacie z wcięciami o długości 3 mm, AWD\_3.2, przedstawiony na wykresie reprezentatywnych krzywych, rys. 4.16. Zaobserwowano, że

wartość wytrzymałości na ścinanie dla tego wariantu wyniosła 18,61 MPa, co stanowi bardzo zbliżony wynik do wariantu podstawowego.

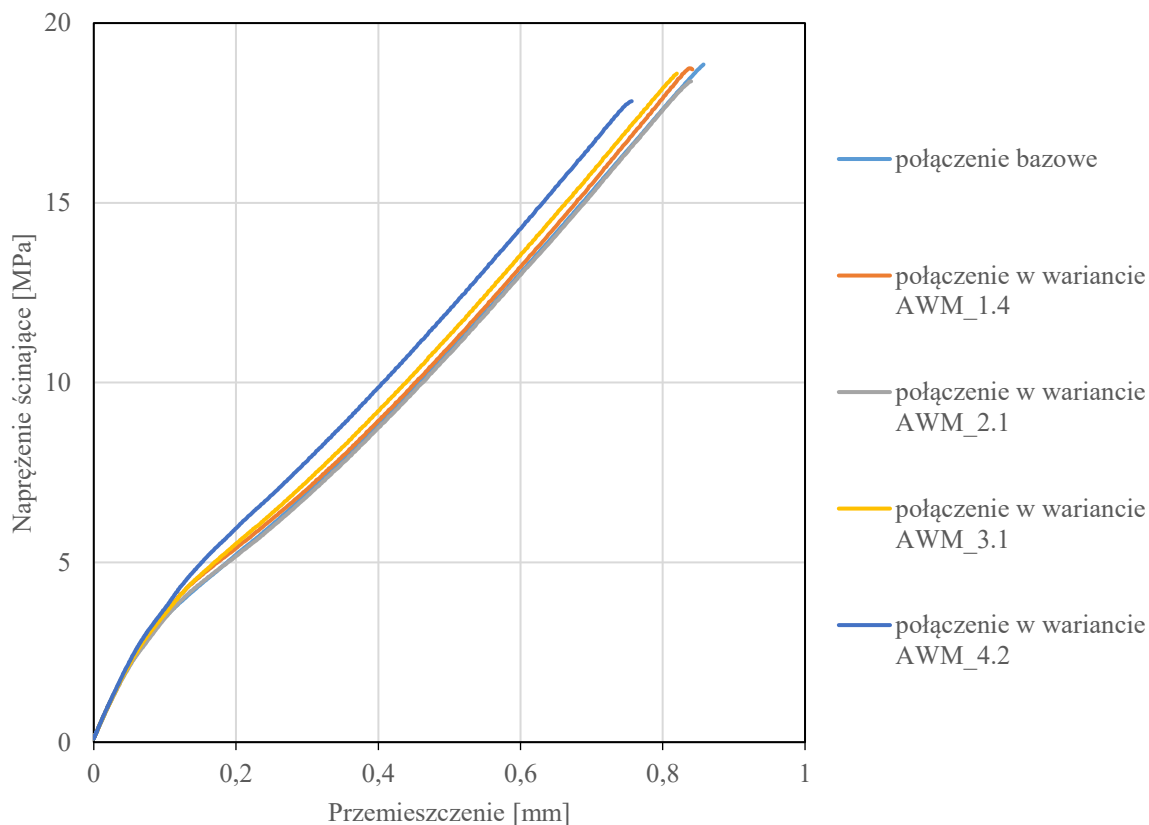
Na podstawie przedstawionych danych dla wariantu drugiego, w którym modyfikacje konstrukcyjne miały szerokość 2 mm zaobserwowano, iż połączenia klejowe wykazały dużo większe wartości nośności oraz wytrzymałości na ścinanie.



Rys. 4. 17. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariantcie AWS, szerokość 2 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne]

Z przedstawionych na rysunku 4.17, reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia dla tej modyfikacji można to potwierdzić. Połączenia klejowe w których geometria wcięcia miała długość 2 mm średnia nośność wyniosła 6402,04 N, co stanowi wzrost do połączenia bazowego o ponad 8%. Dla tego przypadku wartość wytrzymałości na ścinanie wyniosła 20,48 MPa, gdzie dla wariantu jest ona równa 18,83 MPa. Kolejnym wynikiem potwierdzającym wzrost wytrzymałości na ścinanie po zastosowaniu wcięć jest wersja dla wymiaru wcięcia o długości 1 mm. Średnia wartość nośności połączenia wyniosła 6254,54 N, a dla wersji bazowej jest to 5887,21 N, tym samym wykazano wzrost wytrzymałości dla tego złącza o ponad 6 %. Ponadto zaobserwowano także, że w przypadku gdy wcięcia mają długość 3 mm występuje znaczny wzrost wytrzymałości na ścinanie co

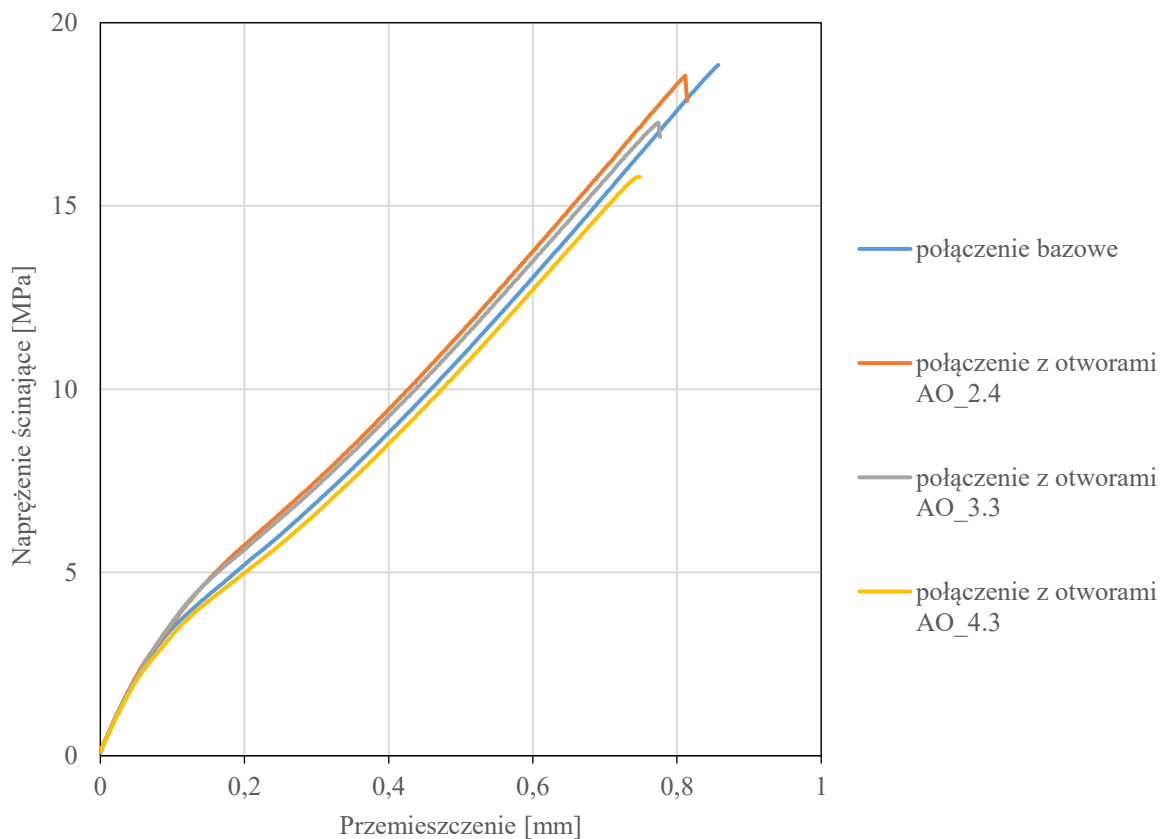
obrazuje reprezentatywna krzywa AWS\_3.1, której wartość wyniosła 19,12 MPa, co przedkłada się na wzrost w porównaniu z wariantem bazowym dla którego wartość to 18,83 MPa.



Rys. 4. 18. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariantcie AWM, szerokość 1 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne]

W wariantcie trzecim zastosowanie wcięć wąskich na czołowej krawędzi zakładki nie ma znaczącego przyrostu nośności połączenia. Wykazano, że dla wersji gdzie wycięcie miało długość 1 mm, próby dały najwyższe wyniki. Trzy spośród czterech prób wykazały większą nośność połączenia niż wariant bazowy. Porównując jednak średnią wartość nośności tych połączeń wynoszącą 5787,15 N do nośności połączenia w wariantcie bazowym jest to 1% różnica przyrostu. Potwierdzeniem zaobserwowanych zjawisk jest wykres reprezentatywnych krzywych w funkcji przemieszczenia dla wersji z wcięciami wąskimi, rys. 4.18. Wykazano także, iż dla wariantów o długości wycięcia 2 mm oraz 3 mm średnia wartość nośności jest niemal identyczna 5645,41 N obarczona zapewne błędem zaokrągleń kalkulacji. Dla tych

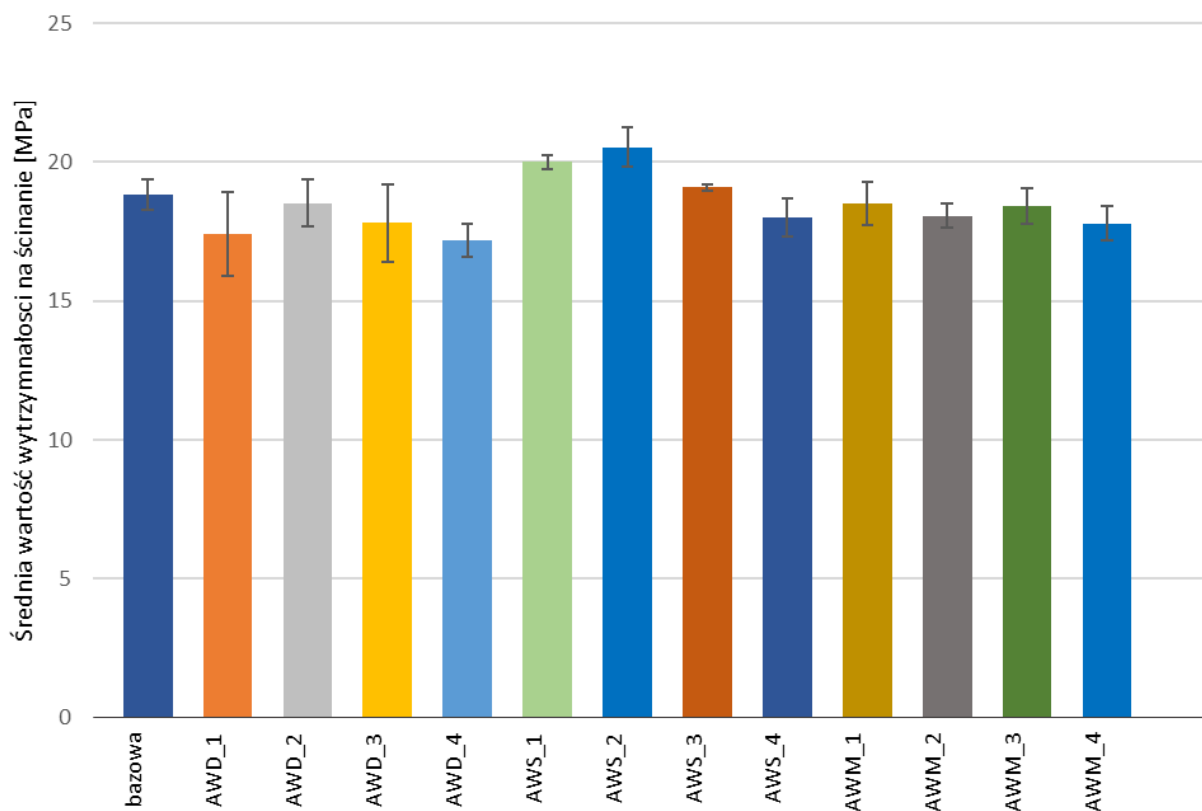
przypadków średnia wartość wytrzymałości na ścianie wyniosła 18,11 MPa dla wariantu krótszego oraz 18,37 MPa dla wariantu przy długości wcięcia równej 3 mm.



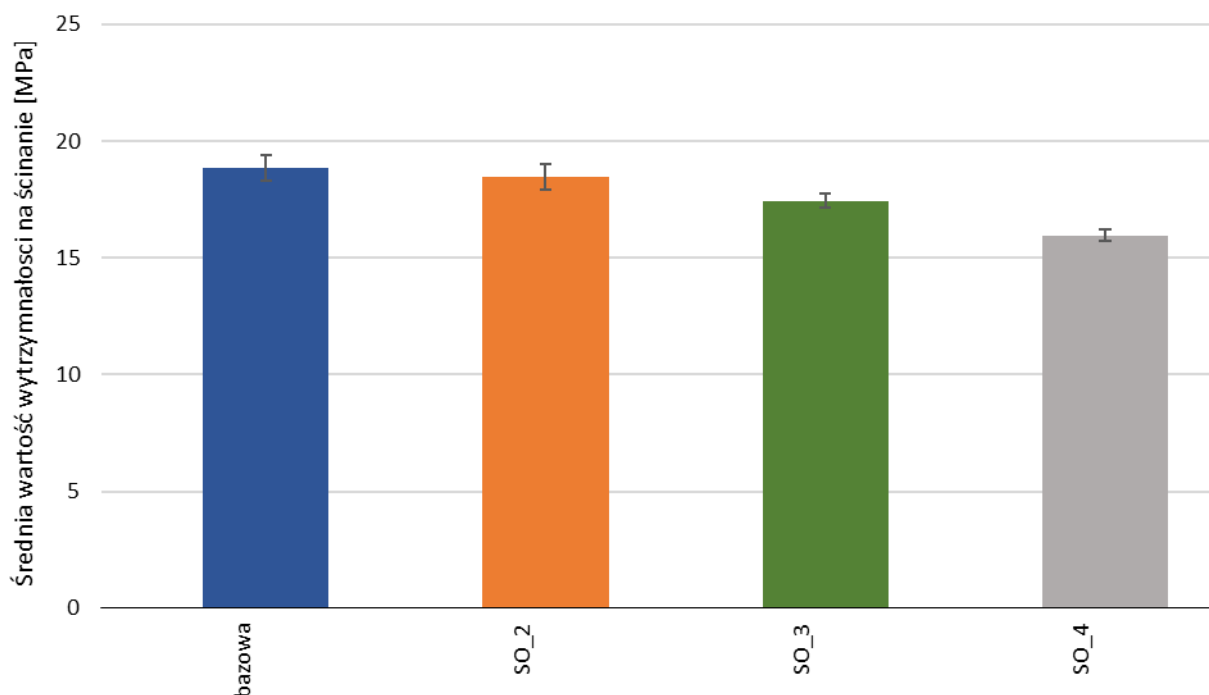
Rys. 4. 19. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z otworami AO w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne]

Analizę statyczną wariantu, w którym modyfikacja konstrukcyjna polegała na wykonaniu otworów przedstawiono na wykresach reprezentatywnych krzywych, rys. 4.19. Wykazano różnicę w wartości nośności połączenia dla otworów o wymiarze 2 mm czego przykładem jest reprezentatywna krzywa wytrzymałości na ścianie AO\_2.4. Wartość wytrzymałości na ścinanie wyniosła 18,55 MPa, w przypadku gdy dla wariantu bazowego jest to 18,83 MPa. Średnia wartość wytrzymałości dla wariantu z otworami o wymiarze 2 mm wyniosła 18,52 MPa. Zaobserwowano, że dla otworów 3 mm występują mniejsze wartości nośności połączeń. Dla wariantu, w którym wymiar otworu to 4 mm średnia wartość nośności połączenia wyniosła 15,97 MPa co daje odstępstwo od wariantu bazowego o ponad 15 %. Tym samym wykazuje to gorszy wynik średniej wytrzymałości na ścinanie, który wyniósł 15,97 MPa dla tej modyfikacji.

Wykresy poniżej, rys. 4.20 oraz rys. 4.21, przedstawiają porównanie średnich wartości wytrzymałości złącza klejowego na ścinanie, porównując wariant bazowy z wariantami z modyfikacją konstrukcyjną polegającą na wykonaniu wcięć, rys. 4.20 oraz porównując wariant bazowy z wariantami, w których w obszarze czołowym zakładki wykonano otwory, rys. 4.21. Zaobserwowano znaczne odchylenie od średniej wartości bazowej  $>1$  MPa dla wariantu z wcięciami średnimi o mniejszych długościach wcięcia tj. dla 1 mm i 2 mm, natomiast zbliżoną wartość z odchyleniem standardowym na poziomie 0,17 MPa wykazano dla tych samych wcięć średnich o długości 3 mm. Pozostałe rozważane warianty z wcięciami charakteryzują się umiarkowanym rozproszeniem wyników. Dla wariantu z otworami na czołowych krawędziach łączonych elementów odchylenie standardowe dla otworów o średnicy 4 mm wynosiło 0,26 MPa, z kolei dla wariantu o średnicy otworu równej 2 mm odchylenie standardowe wynosiło 0,53 MPa. Dla tego wariantu wartość średnia wytrzymałości na ścinanie jest najbardziej zbliżona do wartości próbek bazowych oraz jest największa spośród badanego wpływu zastosowania perforacji w strefie przykrawędziowej.



Rys. 4. 20. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ścinanie dla rozpatrywanych wariantów z wcięciami próbek ze stopu aluminium [opracowanie własne]



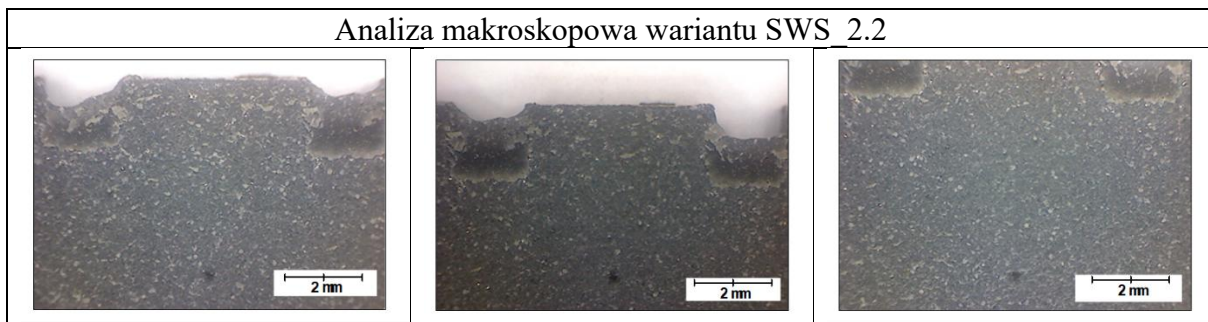
Rys. 4. 21. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ścianie dla rozpatrywanych wariantów z otworami próbek ze stopu aluminium [opracowanie własne]

Wyniki badań wytrzymałości statycznej wskazują, że zastosowane modyfikacje konstrukcyjne w postaci wcięć i otworów wykonane na krawędziach łączonych elementów nie wykazują znaczącego wpływu na właściwości wytrzymałościowe złącza. Wykazane reprezentatywne krzywe uzyskane z przeprowadzonych badań pokazują nieznaczne różnice pomiędzy średnią wartością wytrzymałości na ścianie wariantów ze zmienioną geometrią na krawędzi zakładki od wariantu bazowego. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, iż przedstawione kolejne próby dla rozpatrywanych wariantów użytych modyfikacji charakteryzują się znacznym rozproszeniem wyników z przeprowadzonych badań. Dzieje się tak również porównując różnicę wyników dla kolejnych prób wariantu bazowego. Można zatem stwierdzić, że większe rozproszenie wyników wytrzymałościowych dla badanych wariantów to nie tylko błędy podczas przygotowania powierzchni badanych próbek, czy podczas nakładania kleju. Duże odchyłki mogą wynikać z faktu, iż nacięcia i otwory, które powinny być równomiernie wypełnione klejem prawdopodobnie ze względów technologicznych nie zostały prawidłowo wypełnione. Ponadto klej, który wypełnia przestrzeń wgłębień może zawierać przypadkowe defekty objętościowe takie jak pęcherzyki powietrza przyczyniające się do rozproszenia wyników. Zjawiska te mogą być przyczyną odmiennych właściwości mechanicznych złącza co również może powodować tak znaczne rozproszenie wyników dla kolejnych wykonywanych

prób. Dodatkowo należy także zaznaczyć, iż do rozproszenia wyników mogło przyczynić się możliwe przemieszczanie się elementów sklejonych podczas wiązania, wypływaniem kleju na krawędziach zakładki oraz rozlewanie się kleju wewnątrz zakładki. Zwłaszcza wysokie rozbieżności wyników można zauważyć podczas przeprowadzonych badań próbek ze stali.

#### 4.8 Wyniki analizy faktograficznej dla próbek ze stali S235JR

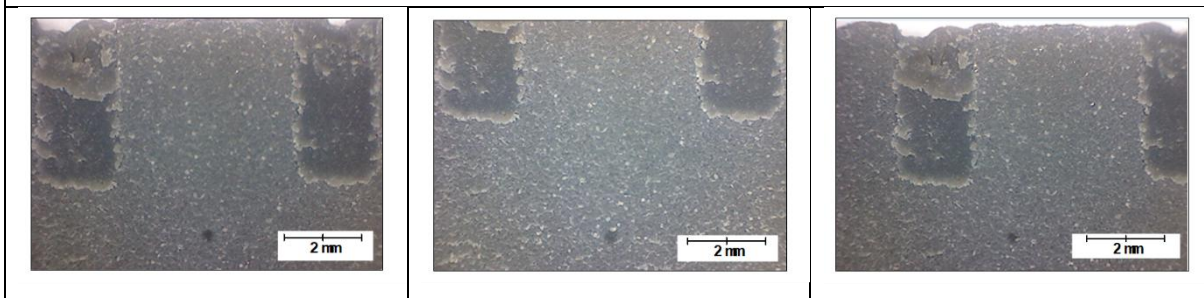
Po badaniach statycznych powierzchnie pęknięć poddano analizie makroskopowej, w wyniku której w niemal każdym przypadku zaobserwowano zniszczenie kohezyjne. Na rysunku 4.22 przedstawiono widok reprezentatywnych powierzchni pęknięć na powierzchni dla jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu z wcięciem średnimi o szerokości 2 mm i długości 2 mm dla próbki ze stali.



Rys. 4. 22. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami średnimi o długości 2 mm [opracowanie własne]

Na wskazanych przełomach można zaobserwować, iż w obszarze wcięć pojawiają się mikropęknięcia, które świadczą o pochłanianiu pewnej części energii dla danego złącza klejowego. Mimo, iż wyniki badań wytrzymałości statycznej nie wykazały znaczącego wpływu dla zastosowanych modyfikacji konstrukcji krawędzi czołowej zakładki na właściwości mechaniczne złącza, dostrzeżono pewne różnice w kształcie pęknięć. Poniżej na rysunku 4.23 przedstawiono widok reprezentatywnych powierzchni pęknięć dla próbek stalowych z wcięciami średnimi o szerokości 2 mm i długości 4 mm.

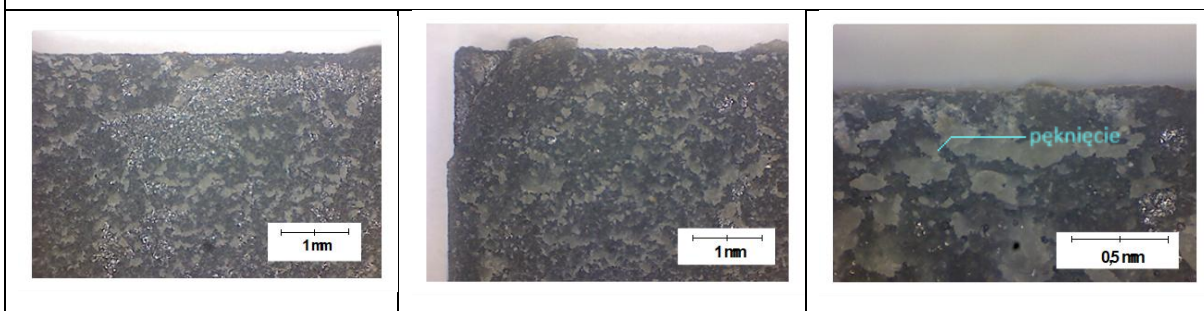
#### Analiza makroskopowa wariantu SWS\_4.3



Rys. 4. 23. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami średnimi o długości 4 mm [opracowanie własne]

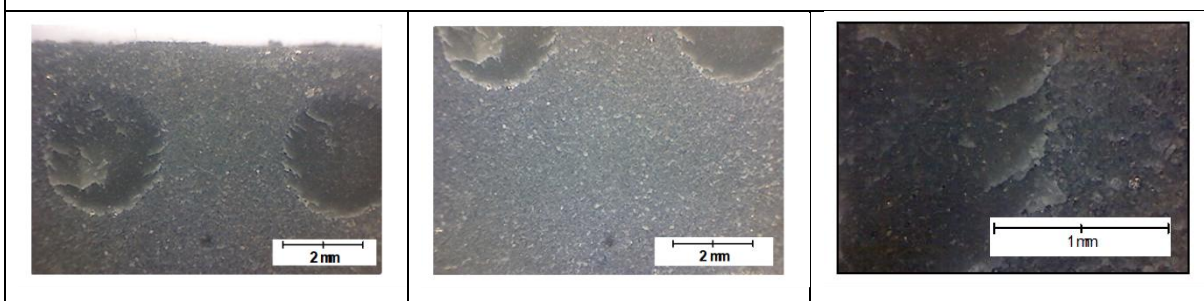
Dla tych reprezentatywnych przykładów powierzchni w strefie przykrawędziowej zakładki, w której wykonano modyfikacje geometryczne można zauważyć znaczące różnice w wielkości pęknięć w porównaniu do wariantu podstawowego, rys. 4.24. W skali makroskopowej zauważalne są większe wady rozerwania warstwy kleju pomiędzy elementami z nacięciami jak również dla tych z otworami, które przedstawiono na rysunku 4.25, reprezentatywne powierzchnie pęknięć dla wariantu z otworami o średnicy 3 mm.

#### Analiza makroskopowa wersji bazowej



Rys. 4. 24. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu podstawowego [opracowanie własne]

#### Analiza makroskopowa wariantu SO\_3



Rys. 4. 25. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z otworami o średnicy 3 mm [opracowanie własne]

Na podstawie przedstawionych powierzchni pęknięć w obszarze złącza klejowego można stwierdzić, iż wykonane modyfikacje mają wpływ na mechanizm pęknięcia złącza klejowego. Ma to także swoje odzwierciedlenie w innych badaniach temu poświęconych, a mianowicie opracowanie [9] autorów Kowalczyk i inni, którzy badali wpływ wykonania otworów na czołowej krawędzi złącza na właściwości badanego połączenia klejowego. Przedstawiony wniosek pozwala na stwierdzenie, iż rozważane modyfikacje konstrukcyjne mogą wpływać na mechanizmy pęknięcia, gdyż pęknięcia te wywołane w obszarze wcięć i otworów pochłaniają pewną część energii czego nie ma w przypadku wariantu bazowego.

#### 4.9 Wyniki analizy faktograficznej dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024 T3

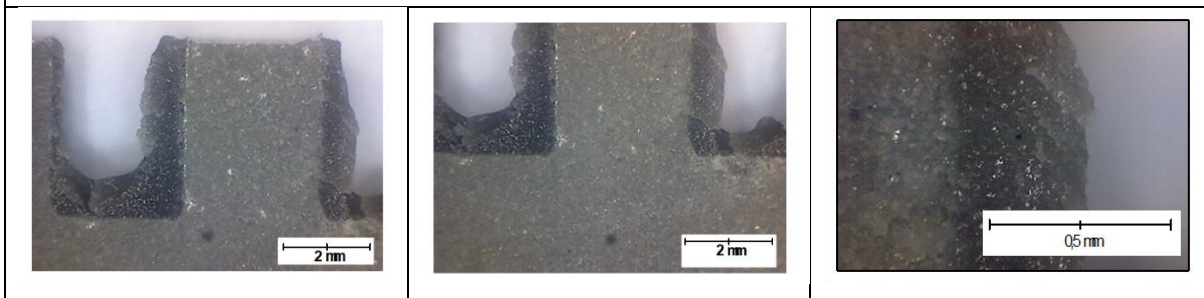
Podobne rozważania przedstawiono dla próbek wykonanych ze stopu aluminium, których powierzchnie po badaniach statycznych poddano analizie makroskopowej. Na rysunku 4.26 przedstawiono reprezentatywne powierzchnie pęknięć dla wariantu z wcięciami szerokimi o szerokości 3 mm i długości 3 mm.



Rys. 4. 26. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami szerokimi o długości 3 mm [opracowanie własne]

Na przedstawionych przełomach można zaobserwować, iż w obszarze wcięć pojawiają się mikropęknięcia, które wskazują na pewien wpływ wprowadzonej modyfikacji na mechanizm pęknięcia złącza klejowego. Pomimo, że wyniki badań wytrzymałości statycznej nie wykazały znaczącego wpływu podczas badań statycznych na właściwości mechaniczne złącza, dostrzeżono pewne różnice w kształcie pęknięć. Na rysunku Rys. 4. 27 przedstawiono widok reprezentatywnych powierzchni pęknięć dla próbek aluminiowych z wcięciami szerokimi o szerokości 3 mm i długości 4 mm.

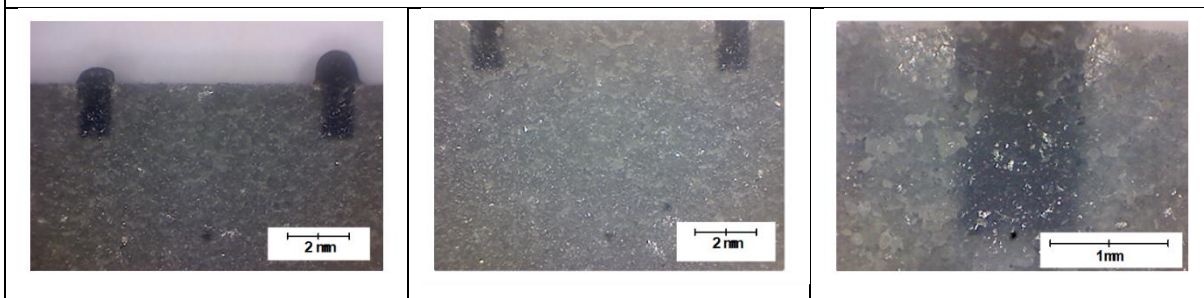
#### Analiza makroskopowa wariantu AWD\_4.2



Rys. 4. 27. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami szerokimi o długości 4 mm [opracowanie własne]

Na podstawie przedstawionych przełamów można zaobserwować zachowanie substancji klejowej po rozerwaniu. W przypadku wcięć szerokich widać wyraźnie, że kleju nie ma w miejscach nacięć, co świadczy o zniszczeniu kohezijnym. Na rysunku Rys. 4. 28, na którym przedstawiono powierzchnie w wariacie z wcięciami wąskimi widać, że klej pozostał w miejscach nacięć.

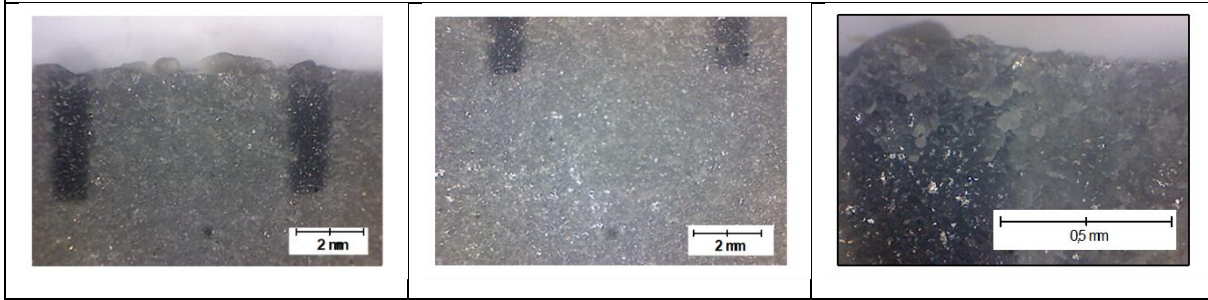
#### Analiza makroskopowa wariantu AWM\_1.2



Rys. 4. 28. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami wąskimi o długości 1 mm [opracowanie własne]

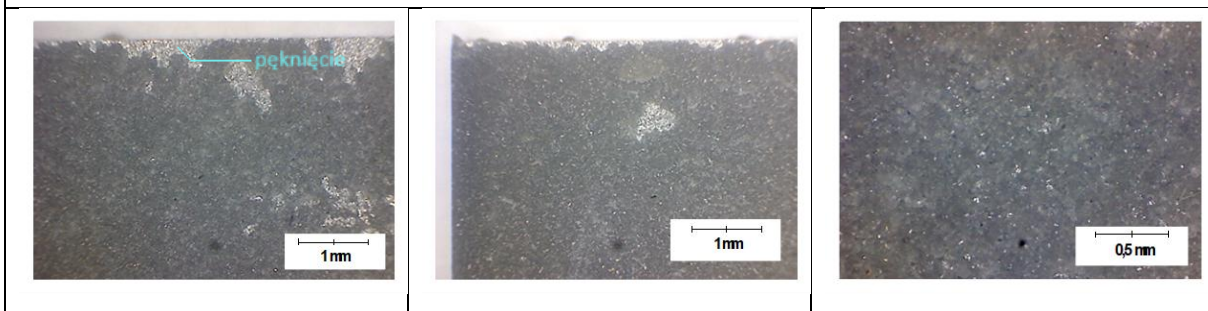
Na podstawie przedstawionych zdjęć makroskopowych przełamów jednowarstwowych złączy klejowych można zaobserwować różnice w wielkościach występujących pęknięć. Na rysunku 4.28, gdzie przedstawiono modyfikacje w wariacie z wcięciami wąskimi o szerokości 1 mm i długości 3 mm porównując z wariantem o wcięciach szerokich, rys. 4.26, widać, iż występowanie pęknięć jest większe. Porównując tym samym badane próbki w wariantach z wcięciami i otworami do wariantu podstawowego w skali makroskopowej zauważalne są większe wady rozerwania warstwy kleju pomiędzy elementami.

### Analiza makroskopowa wariantu AWM\_3.3



Rys. 4. 29. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami wąskimi o długości 3 mm [opracowanie własne]

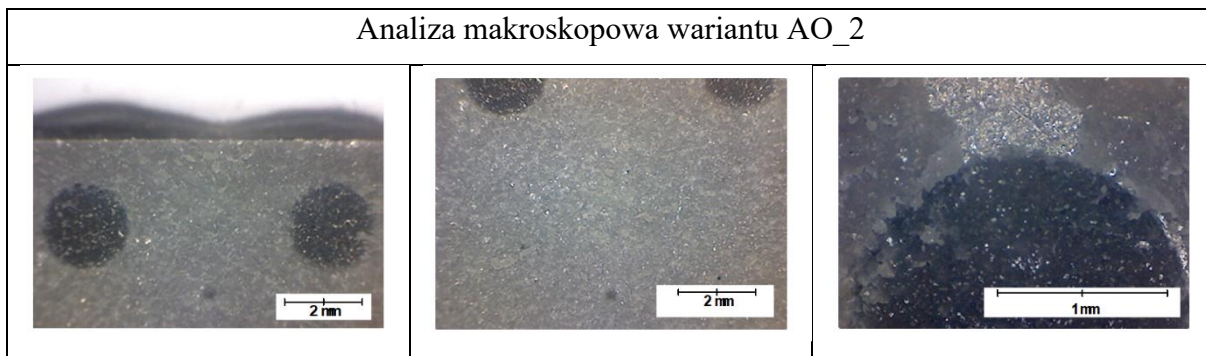
### Analiza makroskopowa wersji bazowej



Rys. 4. 30. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu bazowego [opracowanie własne]

Na mechanizmy pęknięcia mają wpływ także modyfikacje polegające na wykonaniu w strefie przykrawędziowej zakładki otworów. Przykładem tego są przedstawione poniżej powierzchnie pęknięć widoczne na rysunku 4.30 dla wariantu z otworami o średnicy 2 mm oraz na rysunku 4.31 dla wariantu z otworami o średnicy 4 mm. W przypadku próbek ze stopu aluminium powierzchnie pęknięć nie są aż tak wyraźne jak na przełomach próbek stalowych. Jednakże w przypadku próbek aluminiowych widać wyraźniej jak warstwa kleju po zniszczeniu złącza uległa oderwaniu w obszarze otworu i dokładnie widać miejsca prześwitów.

Konkluzje po badaniach statycznych wskazują, iż mimo mało istotnego wpływu zastosowanych modyfikacji na właściwości mechaniczne połączenia klejowego zaobserwowano pewne różnice w kształcie pęknięć. Dlatego pokazanie w skali makroskopowej powierzchni przełomów po zniszczeniu pozwala wskazać większe wady rozerwania warstwy kleju pomiędzy otworami i wcięciami.



Rys. 4. 30. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z otworami o średnicy 2 mm [opracowanie własne]



Rys. 4. 31. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z otworami o średnicy 4 mm [opracowanie własne]

## 4.10 Wyniki analizy statystycznej

Na podstawie uzyskanych wyników z badań eksperymentalnych przeprowadzonych na próbkach ze stali oraz ze stopu aluminium przeprowadzono analizę statystyczną. Proces zebrania i analizowania uzyskanych danych dla badanych w pracy modyfikacji konstrukcyjnych w strefie przykrzewdziowej zakładki połączeń klejowych miał na celu określenie wzorców i trendów, które z zastosowanych modyfikacji jest najbardziej korzystne. Na podstawie uzyskanych wyników badań wytrzymałości statycznej przeprowadzono analizę statystyczną metodą testu t Studenta, testu ANOVA oraz analizę regresji i korelacji.

### 4.10.1 Test t Studenta

Jedną z metod statystycznych jest test t Studenta, który służy do porównania dwóch średnich między sobą, średnią arytmetyczną oraz wartość odchylenia standardowego oraz wariancji. Jest to jedna z mniej skomplikowanych i często wykorzystywanych metod statystycznych, używana do weryfikacji hipotez. Test t Studenta pozwala sprawdzić czy

wartości średnie dwóch wariantów wykazują istotne statystycznie różnice. Dzięki temu testowi poznano jakie są rozrzuty przy wartościach średnich oraz czy różnice te mają istotny wpływ.

Test t Studenta przeprowadzony dla próbek stalowych (tab. 4.33) wykazał, że na 78 porównań wzajemnych zrealizowanych wariantów badań wytrzymałościowych 37 wykazuje istotne statystycznie różnice. Warianty SWS\_4, SWM\_1 oraz SWM\_3 wyraźnie różnią się od pozostałych wariantów (obliczone wartości p-value są mniejszego od 5 %).

Tab. 4. 33. Wartości średnie p-value dla rozpatrywanych wariantów z wcięciami próbek ze stali S235JR

	Ba za	SW D 1	SW D 2	SW D 3	SW D 4	SW S 1	SW S 2	SW S 3	SW S 4	SW M 1	SW M 2	SW M 3	SW M 4
Baza	-	0,1 %	7,4%	31,0 %	27,1 %	15,2 %	39,6 %	22,3 %	0,01 %	0,02 %	16,3 %	0,03 %	9,9%
SWD _1	-	1,1 %	13,7 %	2,8 %	24,8 %	4,1 %	24,7 %	0,1 %	0,4%	16,5 %	0,5%	12,7 %	
SWD _2	-	6,5%	20,3 %	3,2 %	7,0 %	5,1 %	0,3 %	0,05 %	3,3%	0,07 %	2,5%		
SWD _3	-	20,2 %	34,3 %	39,3 %	39,4 %	2,2 %	0,4%	38,8 %	0,6%	35,8 %			
SWD _4	-	10,7 %	24,2 %	15,0 %	0,5 %	0,08 %	11,7 %	0,1%	9,2%				
SWS _1	-	22,8 %	46,0 %	3,4 %	0,6%	43,9 %	0,9%	45,6 %					
SWS _2	-	29,2 %	0,7 %	0,06 %	25,8 %	0,09 %	21,1 %						
SWS _3	-	4,8 %	1,1%	48,8 %	1,6%	49,3 %							
SWS _4	-	4,0%	1,6%	7,7%	0,7%								
SW M 1	-	0,3%	33,7 %	0,1%									
SW M 2	-	0,4%	47,5 %										
SW M 3	-	50,0 %											
SW M 4	-												

Przeprowadzony test t Studenta dla próbek stalowych (tab. 4.34), w których modyfikacjami były otwory w strefie przykrawędziowej, nie wykazał istotnych statystycznie różnic pomiędzy wartościami średnimi nośności porównywanych wariantów (obliczone wartości p-value są większe od 5 %).

Tab. 4. 34. Wartości średnie p-value dla wariantów z otworami próbek ze stali S235JR

	Baza	SO_2	SO_3	SO_4
Baza	-	44,4%	27,4%	46,9%
SO_2		-	29,4%	42,5%
SO_3			-	26,9%
SO_4				-

Test t Studenta przeprowadzony dla próbek aluminiowych (tab. 4.35) wykazał, że na 78 porównań wzajemnych zrealizowanych wariantów badań wytrzymałościowych 37 wykazuje istotne statystycznie różnice. Warianty AWS\_1, AWS\_2 oraz AWM\_4 wyraźnie różnią się od pozostałych wariantów (obliczone wartości p-value są mniejszego od 5 %).

Tab. 4. 35. Wartości średnie p-value dla rozpatrywanych wariantów z wcięciami próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3

	Ba za	AW D_1	AW D_2	AW D_3	AW D_4	AW S_1	AW S_2	AW S_3	AW S_4	AW M_1	AW M_2	AW M_3	AW M_4
Baza	-	27,8 %	3,4 %	12,7 %	2,5 %	0,7 %	0,3 %	28,0 %	5,3%	4,7%	32,5 %	12,9 %	0,2%
AW D_1		-	13,4 %	31,5 %	9,0%	0,6 %	0,2 %	12,5 %	15,8 %	7,9%	46,1 %	21,8 %	0,8%
AW D_2			-	24,1 %	31,3 %	0,01 %	0,02 %	0,4 %	48,8 %	16,9 %	13,0 %	43,3 %	1,7%
AW D_3				-	15,6 %	0,1 %	0,06 %	3,6 %	27,0 %	11,3 %	28,9 %	30,5 %	1,1%
AW D_4					-	0,04 %	0,02 %	0,7 %	35,2 %	23,0 %	8,8%	46,9 %	5,8%
AWS 1						-	11,0 %	0,02 %	0,1 %	0,9%	1,0%	1,6%	0,01 %
AWS 2							-	0,5 %	0,03 %	0,4%	0,3%	0,7%	0,01 %
AWS 3								-	1,7 %	3,4%	17,0 %	8,4%	0,1%
AWS 4									-	17,9 %	14,9 %	44,2 %	3,6%
AW M_1										-	7,4%	25,4 %	45,7 %
AW M_2											-	20,5 %	1,0%
AW M_3												-	16,6 %
AW M_4													-

Przeprowadzony test t Studenta dla próbek aluminiowych (tab. 4.36), w których modyfikacjami były otwory w strefie przykrawędziowej, wykazał istnienie istotnych statystycznie różnic pomiędzy wartościami średnimi nośności porównywanych wariantów

(obliczone wartości p-value są większe od 5 %). Jedynie wartość średnia nośności wariantu AO\_2 nie różni się istotnie statystycznie od wariantu bazowego.

Tab. 4. 36. Wartości średnie p-value dla wariantów z otworami próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3

	Baza	AO_2	AO_3	AO_4
Baza	-	18,8%	0,31%	0,009%
AO_2		-	0,44%	0,004%
AO_3			-	0,001%
AO_4				-

#### 4.10.2 Test ANOVA

Analiza wariancji ANOVA wykorzystywana jest do analizy różnic pomiędzy średnimi w różnych grupach w zależności od jednego lub wielu działających równocześnie czynników. Analiza pozwala wyodrębnić źródła zmienności i ustalić czy wyodrębnione czynniki wpływają na różnice wartości średnich. Analiza wariancji ANOVA jest testem statystycznym sprawdzającym, czy dwie lub więcej średnich jest sobie równych. ANOVA pomaga ustalić, czy zaobserwowane różnice między grupami są statystycznie istotne, czy też są losowe. W przypadku istotności statystycznej, test wskazuje, że co najmniej jedna z grup ma inną średnią, ale nie precyzuje, które to jest.

W przypadku niniejszego opracowania analizę wariancji wykorzystano do porównania wzajemnie ze sobą kilku wariantów modyfikacji konstrukcyjnej jakim było wykonanie wcięć i otworów w obszarze zakładki złącza połączenia klejowego. Jednoczynnikową analizę ANOVA zastosowano w celu porównania wariantów zmiennej średnicy otworów oraz wariantów zmiennej szerokości i długości wykonanych wcięć. Parametrem wskazującym, że średnie wartości są statystycznie różne jest obliczana wartość prawdopodobieństwa p-value.

W tabeli 4.37 zamieszczono wyniki testu ANOVA średnich wartości nośności w zależności od szerokości wykonanego wcięcia dla próbek ze stali S235JR. Zamieszczony w tabeli wykres zmienności nośności dla wariantów różniących się szerokością wykonanego wcięcia, (odpowiednio 1 mm, 2 mm i 3 mm) oraz obliczona wartość p-value wynosząca 0,001 (p-value < 0,05) wskazują, że szerokość wcięcia w istotny sposób wpływa na wartość nośność badanych połączeń klejowych.



otworu, (odpowiednio 2 mm, 3 mm oraz 4 mm) oraz obliczona wartość p-value wynosząca 0,700 (p-value > 0,05) wskazują, że średnica otworu nie wpływa w istotny sposób na wartość nośność badanych połączeń klejowych.

Tab. 4. 39. Test ANOVA średnich wartości nośności w zależności od średnicy otworów wykonanych w próbkach ze stali S235JR

Parametry analizy:					
Source	DF	SS	MS	F	p-value
D	2	339144	169572	0,37	0,700
Error	12	5544911	462076		
Total	14	5884055			

S = 679,8    R-Sq = 5,76%    R-Sq(adj) = 0,00%

**Wykres poszczególnych wariantów dla zmiennej średnicy otworów:**

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev	
2	5	7332,1	346,0	-----+-----+-----+-----+-----+ (-----*-----)	
3	5	7033,1	1098,9	(-----*-----)	
4	5	7368,9	242,6	(-----*-----)	

-----+-----+-----+-----+-----+  
6500            7000            7500            8000

Pooled StDev = 679,8

W tabeli 4.40 zamieszczono wyniki testu ANOVA średnich wartości nośności w zależności od szerokości wykonanego wcięcia dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. Zamieszczony w tabeli wykres zmienności nośności dla wariantów różniących się szerokością wykonanego wcięcia, (odpowiednio 1 mm, 2 mm i 3 mm) oraz obliczona wartość p-value wynosząca 0,000 (p-value < 0,05) wskazują, że szerokość wcięcia w istotny sposób wpływa na wartość nośność badanych połączeń klejowych.

Tab. 4. 40. Test ANOVA średnich wartości nośności w zależności od szerokości wykonanego wcięcia dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3

Parametry analizy:					
Source	DF	SS	MS	F	p-value
W	2	2682268	1341134	13,77	0,000
Error	57	5553088	97423		
Total	59	8235356			

S = 312,1    R-Sq = 32,57%    R-Sq(adj) = 30,20%

**Wykres poszczególnych wariantów dla zmiennej szerokości:**

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev	
1	20	5704,7	198,0	-----+-----+-----+-----+-----+ (-----*-----)	
2	20	6067,7	328,2	(-----*-----)	
3	20	5566,3	381,2	(-----*-----)	

-----+-----+-----+-----+-----+  
5600            5800            6000            6200

Pooled StDev = 312,1

W tabeli 4.41 zamieszczono wyniki testu ANOVA średnich wartości nośności w zależności od długości wykonanego wcięcia dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. Zamieszczony w tabeli wykres zmienności nośności dla wariantów różniących się długością wykonanego wcięcia, (odpowiednio 1 mm, 2 mm, 3 mm oraz 4 mm) oraz obliczona wartość p-value wynosząca 0,020 ( $p\text{-value} < 0,05$ ) wskazują, że długość wcięcia w istotny sposób wpływa na wartość nośność badanych połączeń klejowych.

Tab. 4. 41. Test ANOVA średnich wartości nośności w zależności od długości wykonanego wcięcia dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3

Parametry analizy:					
Source	DF	SS	MS	F	p-value
L	3	1318294	439431	3,56	0,020
Error	56	6917062	123519		
Total	59	8235356			
S = 351,5    R-Sq = 16,01%    R-Sq(adj) = 11,51%					
Wykres poszczególnych wariantów dla zmiennej długości:					
Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev	
1	15	5828,7	458,3	+-----+-----+-----+-----+----- (-----*-----)	
2	15	5963,4	384,6	(-----*-----)	
3	15	5774,0	297,4	(-----*-----)	
4	15	5552,3	218,5	(-----*-----)	
				5400	5600    5800    6000
Pooled StDev = 351,5					

W tabeli 4.42 zamieszczono wyniki testu ANOVA średnich wartości nośności w zależności od średnicy otworu wykonanego w strefie przykrawędziowej dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. Zamieszczony w tabeli wykres zmienności nośności dla wariantów różniących się średnicą otworu, (odpowiednio 2 mm, 3 mm oraz 4 mm) oraz obliczona wartość p-value wynosząca 0,000 ( $p\text{-value} < 0,05$ ) wskazują, że średnica otworu wpływa w istotny sposób na wartość nośność badanych połączeń klejowych.

Tab. 4. 42. Test ANOVA średnich wartości nośności w zależności od średnicy otworów wykonanych w próbkach ze stopu aluminium EN AW-2024-T3

Parametry analizy:					
Source	DF	SS	MS	F	p-value
D	2	1677968	838984	58,89	0,000
Error	12	170948	14246		
Total	14	1848916			
S = 119,4    R-Sq = 90,75%    R-Sq(adj) = 89,21%					
Wykres poszczególnych wariantów dla zmiennej średnicy otworów:					
Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev	
2	5	5787,8	166,8	(---*---)	
3	5	5467,3	92,2	(---*---)	
4	5	4974,6	80,0	(---*---)	
				5100	5400    5700    6000
Pooled StDev = 119,4					

Przeprowadzona analiza ANOVA wykazała istotny wpływ jaki mają szerokość i długość wykonanych wcięć na nośność połączeń klejowych dla próbek ze stali jak i tych wykonanych ze stopu aluminium. Wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA potwierdzają, iż występujące różnice pomiędzy średnimi wartościami są istotne statystycznie. Jednakże należy podkreślić, iż wykonane testy ANOVA dla wariantów z otworami są inne dla próbek ze stali oraz tych z aluminium. W tych przypadkach o istotnym wpływie średnicy otworu na nośność połączenia możemy mówić tylko w przypadku próbek ze stopu aluminium. Dla próbek ze stali w przyjętym zakresie zmienności czynników jakimi były średnice otworów zmienne niezależne nie mają istotnego wpływu na zmienną zależną jaką jest wartość średniej nośności.

#### 4.10.3 Analiza regresji korelacji

Dla badanych połączeń klejowych przeprowadzono również analizę regresji. Statystyczny model regresyjny to metoda służąca do modelowania związków pomiędzy dwoma lub większą ilością zmiennych poprzez dopasowanie do nich funkcji. Umożliwia ona przewidywanie nieznanymi wartości jednych wielkości na podstawie znanych wartości innych. W niniejszej pracy posłużono się prostą regresją liniową, która zakłada użycie tylko jednego predykatora do wyjaśnienia zmiennej zależnej. Równanie dla prostej regresji liniowej jest zbliżone do równania funkcji liniowej. Zatem wzór na regresję liniową możemy zapisać:

$$y = a + bx \tag{4.1}$$

gdzie:

y – zmienna zależna (zmienna wyjaśniana, przewidywana),

x – zmienna niezależna,

a – stała, wyraz wolny,

b – współczynnik regresji, współczynnik kierunkowy.

Dodatkowo wykonano analizę związku pomiędzy więcej niż jedną zmienną niezależną a zmienną zależną, czyli regresję wieloraką. Pozwoliła ona na określenie pewnej liczby czynników co do których można przypuszczać, że od nich zależy istotny wpływ na nośność połączenia klejowego.

Analiza regresji pozwala określić w jakim stopniu poszczególne zmienne niezależne wpływają na zmienną zależną oraz przewidywać wartość danej zmiennej na podstawie wartości innych zmiennych. Założono, że wyniki analizy są ważne statystycznie, gdy wartość prawdopodobieństwa, wartości p-value są niższe niż poziom istotności wynoszący 0,050, czyli poniżej 5 %. Wartości prawdopodobieństwa oraz równania regresji liniowej przedstawione są w tabelach poniżej.

W tabeli 4.43 przedstawiono wyniki analizy dla wpływu szerokości wcięcia na nośność połączenia próbek wykonanych ze stali S235JR. Można stwierdzić, iż wskaźniki Constant (stała) o wartości 6980 oraz współczynnik kierunkowy x równy 373 mają istotne znaczenie w wyznaczonym równaniu liniowym regresji, co potwierdza p-value równe 0,000. Ostateczny wynik dla równania liniowego p-value o wartości 0,000 potwierdza, że szerokość wcięcia ma istotny wpływ na wartość nośności złącza. W badanym obszarze zmienności szerokości wcięcia jego zwiększanie powoduje wzrost nośności połączeń klejowych. Wykres regresji funkcji liniowej opisującej zależność nośności połączenia klejowego od szerokości wcięcia, również potwierdza, że badany model jest istotny statystycznie. Wartość współczynnika korelacji liniowej  $R = 0,459$  wskazuje, że pomiędzy nośnością połączeń klejowych a szerokością wcięcia występuje słaba dodatnia korelacja.

Tab. 4. 43. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek stalowych określająca wpływ parametru szerokości wcięcia na nośność złącza klejowego.

<b>Równanie liniowe regresji:</b>					
$y = 6980 + 373 x$					
Predictor	Coef	SE Coef	T	p-value	
Constant	6980,4	197,1	35,42	0,000	
x	373,13	91,22	4,09	0,000	
<b>Analiza wariancji:</b>					
Source	DF	SS	MS	F	p-value
Regression	1	5569177	5569177	16,73	0,000
Residual Error	58	19303874	332825		
Total	59	24873050			
<b>Współczynnik korelacji liniowej</b>			<b>R = 0,459</b>		
Wykres regresji funkcji nośności złącza od szerokości wcięcia :					

Drugą analizę wykonano dla zbadania wpływu długości wcięcia na nośność złącza klejowego i wyniki przedstawiono w tabeli 4.44. Zaobserwowano, iż wartość stała równania wynosząca 7845 wykazuje istotny wpływ, gdyż p-value jest mniejsze od 5 %. Natomiast współczynnik kierunkowy równy 47,5 przy zmiennej zależnej jaką jest długość wcięcia nie jest istotny dla wartości nośności złącza ponieważ p-value jest 0,531 i jest większe od 5 %. Tym samym nośność połączenia klejowego w tym przypadku nie jest uzależniona od głębokości wykonanego wcięcia w strefie czołowej zakładki. Nie jest także istotne równanie liniowe regresji dla badanego parametru zmiennej długości wcięcia. Wartość współczynnika korelacji liniowej  $R = 0,0$  wskazuje na brak korelacji pomiędzy nośnością połączeń klejowych a długością wcięcia. Nie występuje statystyczna zależność pomiędzy długością nacięcia zakładki a nośnością dla tego złącza.

Tab. 4. 44. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek stalowych określająca wpływ parametru długości wcięcia na nośność złącza klejowego

Równanie liniowe regresji:					
$y = 7845 - 47,5 x$					
Predictor	Coef	SE Coef	T	p-value	
Constant	7845,3	206,4	38,01	0,000	
x	-47,46	75,36	-0,63	0,531	
Analiza wariancji:					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	168941	168941	0,40	0,531
Residual Error	58	24704109	425933		
Total	59	24873050			
Współczynnik korelacji liniowej			R = 0,0		
Wykres regresji funkcji nośności złącza od szerokości wcięcia :					

Poddając analizie wpływ kilku zmiennych zastosowano regresję wieloraką. Tabela 4.45 przedstawia wyniki dla analizy równania liniowego regresji uzależnionego od dwóch zmiennych jakimi są szerokość i długość wykonanego wcięcia w badanej próbce (oznaczenie W-szerokość, L-długość). Wyniki równania wskazują wyraźnie, iż stała równa 7099 oraz współczynnik W równy 373, czyli parametr szerokości wykazały p-value poniżej 5%, co potwierdza ich istotny wpływ na wartość nośności złącza, natomiast współczynnik L, parametr długości nie jest istotny statystycznie gdyż wartość jego p-value to 0,481. Równanie regresji dla rozważanego przypadku jest traktowane jako istotne ze względu na wynik wartości p-value, który jest równy 0,001 i mieści się w 5% dla zadanego założenia istotności. Wykres powierzchniowy do równania regresji wielorakiej uwidacznia występowanie wartości minimalnych nośności dla szerokości wcięcia równej 1 mm oraz głębokości wcięcia równej 2 mm.

Tab. 4. 45. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek stalowych określająca wpływ parametrów szerokości i długości wcięcia na nośność złącza klejowego

Równanie liniowe regresji:						
$y = 7099 + 373 W - 47,5 L$						
Predictor	Coef	SE Coef	T	p-value		
Constant	7099,0	259,1	27,40	0,000		
W	373,13	91,61	4,07	0,000		
L	-47,46	66,90	-0,71	0,481		
S = 579,397    R-Sq = 23,1%    R-Sq(adj) = 20,4%						
Analiza wariancji:						
Source	DF	SS	MS	F	p-value	
Regression	2	5738118	2869059	8,55	0,001	
Residual Error	57	19134933	335701			
Total	59	24873050				
Wykres konturowy nośności złącza od szerokości i długości wcięcia :						

Wyniki analizy regresji dla wariantu z otworami przedstawia tabela 4.46. Dla tego przypadku zaobserwowano, iż wartość p-value dla stałej wynoszącej 7189 jest równa 0,000. z kolei wskaźnik p-value przy zmiennej jaką jest średnica otworu jest równy 0,932, znacząco powyżej 5% co świadczy o braku istotnego wpływu średnicy otworu na nośność złącza klejowego. Średnica wykonanych otworów nie jest istotna dla całego równania regresji liniowej, p-value wynosi 0,932. Wartość współczynnika korelacji liniowej  $R = 0,0$  wskazuje na brak korelacji pomiędzy nośnością połączeń klejowych a średnicą otworów.

Tab. 4. 46. Analiza regresji liniowej wariantu z otworami dla próbek stalowych określająca wpływ wymiaru średnicy otworu na nośność złącza klejowego

Równanie liniowe regresji:					
$y = 7189 + 18 x$					
Predictor	Coef	SE Coef	T	p-value	
Constant	7189,4	661,3	10,87	0,000	
x	18,4	212,7	0,09	0,932	
Analiza wariancji:					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	3400	3400	0,01	0,932
Residual Error	13	5880655	452358		
Total	14	5884055			
Współczynnik korelacji liniowej			<b>R = 0,0</b>		
Wykres regresji funkcji nośności złącza od średnicy otworu :					

Statystyczne modele regresyjne opracowano także dla połączeń klejowych wykonanych ze stopu aluminium. Wyniki tej analizy prezentują się następująco. W tabeli 4.47 pokazano równanie regresji liniowej opisujące wpływ szerokości wcięcia na nośność złącza. Jak widać w zamieszczonej tabeli, parametr p-value dla stałej równej 5918 jest poniżej 5%, co oznacza że stała ma istotny wpływ, natomiast współczynnik dla szerokości wcięcia wynoszący 69,2 nie ma istotnego wpływu na nośność. Tym samym całe równanie regresji liniowej nie wykazuje istotnego statystycznie wpływu na otrzymane wartości nośności złączy. Wartość współczynnika korelacji liniowej  $R = -0,08$  wskazuje, że pomiędzy nośnością połączeń klejowych a szerokością wcięcia występuje bardzo słaba ujemnej korelacja.

Tab. 4. 47. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek aluminiowych określająca wpływ parametru szerokości wcięcia na nośność złącza klejowego

Równanie liniowe regresji:					
$y = 5918 - 69,2 x$					
Predictor	Coef	SE Coef	T	p-value	
Constant	5917,9	127,2	46,52	0,000	
x	-69,18	58,88	-1,17	0,245	
Analiza wariancji:					
Source	DF	SS	MS	F	p-value
Regression	1	191410	191410	1,38	0,245
Residual Error	58	8043946	138689		
Total	59	8235356			
Współczynnik korelacji liniowej			<b>R = - 0,08</b>		
Wykres regresji funkcji nośności złącza od szerokości wcięcia :					

Zaprezentowane wyniki analizy regresji dla badanej zmiennej zależnej jaką jest długość wykonanego wcięcia przedstawiono w tabeli 4.48. Równanie regresji liniowej w tym przypadku ujawnia istotny wpływ na nośność złącza, jako całe równanie oraz jego składowe. Stała równania wynosząca 6034 dla której p-value jest poniżej 5% i współczynnik dla parametru długości wcięcia, który wynosi 102 i ma wartość p-value 0,017. Wykres regresji funkcji nośności złącza od długości wcięcia układa się liniowo, co jest potwierdzeniem wyników istotności badanej zmiennej. W badanym obszarze zmienności długości wcięcia jego zwiększanie powoduje zmniejszenie nośności połączeń klejowych. Wartość współczynnika korelacji liniowej  $R = 0,28$  wskazuje, że pomiędzy nośnością połączeń klejowych a szerokością wcięcia występuje słaba ujemna korelacja.

Tab. 4. 48. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek ze stopu aluminium określająca wpływ parametru długości wcięcia na nośność złącza klejowego

Równanie liniowe regresji:					
$y = 6034 - 102 x$					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	6034,2	113,4	53,22	0,000	
x	-101,86	41,40	-2,46	0,017	
Analiza wariancji:					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	778125	778125	6,05	0,017
Residual Error	58	7457231	128573		
Total	59	8235356			
Współczynnik korelacji liniowej			<b>R = - 0,28</b>		
Wykres regresji funkcji nośności złącza od długości wcięcia :					

Kolejną analizę wykonano aby zbadać wpływ zależności dwóch zmiennych jakimi są szerokość i długość wykonanego wcięcia w czołowej strefie zakładki. Przedstawione w tabeli 4.49 wyniki istotności współczynników wykazują, iż parametr szerokości wcięcia (oznaczenie W) nie ma istotnego wpływu gdyż p-value wynosi 22,5%, natomiast parametr długości wcięcia (oznaczony L) ma istotny wpływ na nośność gdyż z kolei jego p-value wynosi 1,6 %. Istotny wpływ ma także stała równa 6173 dla której p-value jest 0.00. Całe równanie liniowe regresji o wartości p-value równej 0,028, czyli  $> 5\%$ , jest więc istotne statystycznie dla badanego wpływu na nośność połączenia klejowego. Z wykresu powierzchniowego do równania regresji wielorakiej wynika, iż maksymalną nośność połączenia klejowe uzyskują przy szerokości wcięcia w zakresie od 1,5 do 2,5 mm oraz przy długości wcięcia w zakresie od 1,0 do 2,0 mm.

Tab. 4. 49. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek ze stopu aluminium określająca wpływ parametrów szerokości i długości wcięcia na nośność złącza klejowego

Równanie liniowe regresji:					
$y = 6173 - 69,2 W - 102 L$					
Predictor	Coef	SE Coef	T	p-value	
Constant	6172,6	159,7	38,66	0,000	
W	-69,18	56,45	-1,23	0,225	
L	-101,86	41,23	-2,47	0,016	
Analiza wariancji:					
Source	DF	SS	MS	F	p-value
Regression	2	969535	484767	3,80	0,028
Residual Error	57	7265821	127471		
Total	59	8235356			
Wykres konturowy nośności złącza od szerokości i długości wcięcia :					

W tabeli 4.50 przedstawiono wyniki analizy regresji przeprowadzonej dla próbek ze stopu aluminium wariantu z otworami. Analiza wykazała istotny wpływ stałej równania wynoszącej 6630 dla której p-value jest równe 0,000. Tak samo istotny wpływ ma współczynnik przy średnicy otworu p-value równy 0,000. Analiza regresji wykazała, iż całe równanie jest istotne, zatem na nośność złącza istotny wpływ ma średnica otworów wykonanych w strefie przykrawędziowej zakładki. W badanym obszarze zmienności średnicy otworu, jego zwiększanie powoduje zmniejszenie nośności połączeń klejowych. Wartość współczynnika korelacji liniowej  $R = -0,94$  wskazuje, że pomiędzy nośnością połączeń klejowych a średnicą otworów występuje bardzo mocna ujemnej korelacja.

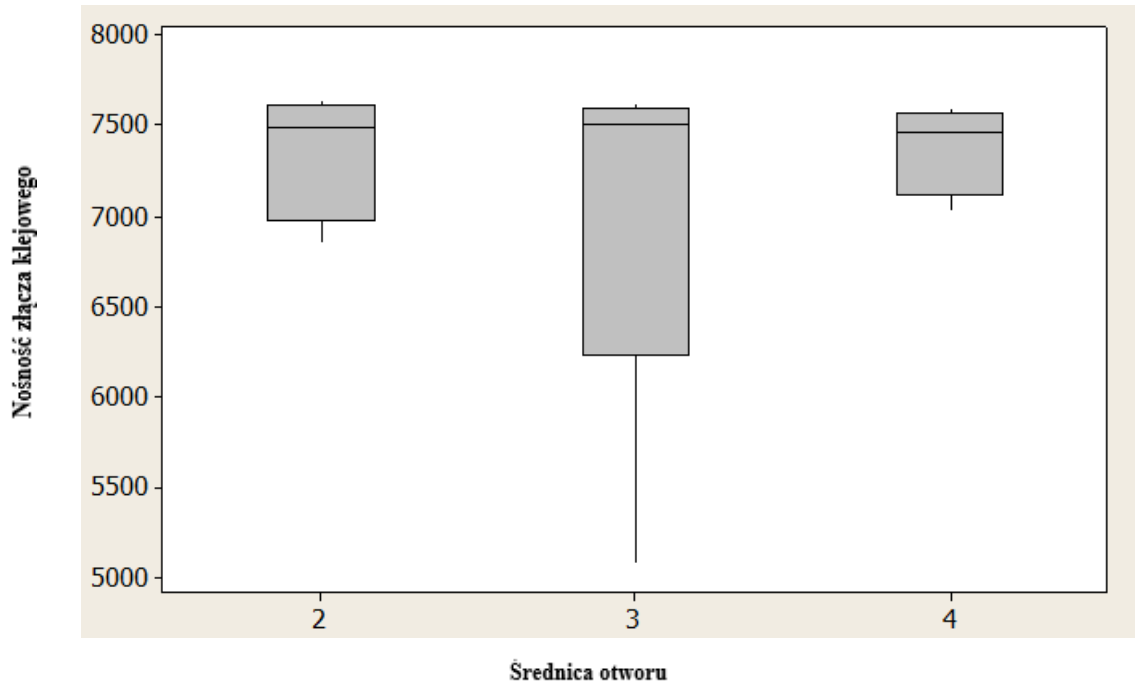
Tab. 4. 50. Analiza regresji liniowej wariantu z otworami dla próbek aluminiowych określająca wpływ wymiaru średnicy otworu na nośność złącza klejowego

Równanie liniowe regresji:					
$y = 6630 - 407 x$					
Predictor	Coef	SE Coef	T	p-value	
Constant	6629,7	120,6	54,96	0,000	
x	-406,60	38,80	-10,48	0,000	
Analiza wariancji:					
Source	DF	SS	MS	F	p-value
Regression	1	1653232	1653232	109,83	0,000
Residual Error	13	195684	15053		
Total	14	1848916			
Współczynnik korelacji liniowej			<b>R = - 0,94</b>		
Wykres regresji funkcji nośności złącza od średnicy otworu :					

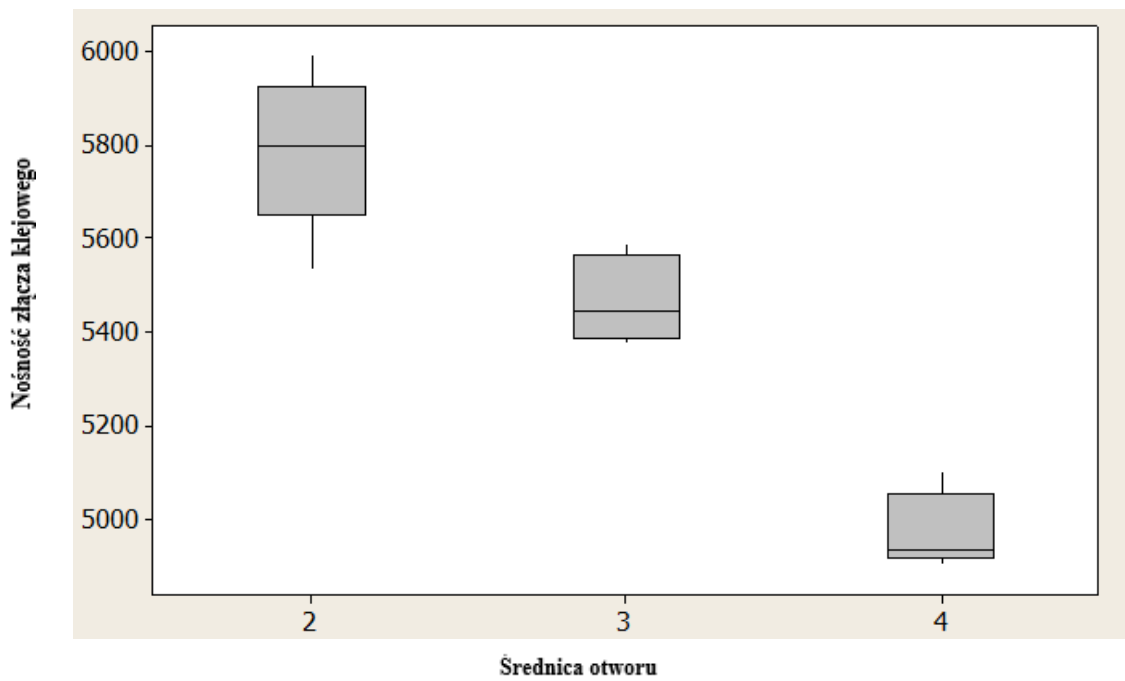
#### 4.10.4 Analiza Boxplot

Do potwierdzenia wyników przeprowadzonych analiz opisanych powyżej wykonano również wykresy Boxplot. Jest to forma graficznego przedstawienia rozkładu cech statystycznych, która wspomaga procesy analizy i interpretacji danych statystycznych. Pozwala ująć na jednym wykresie informacje dotyczące położenia, rozproszenia oraz kształtu rozkładu empirycznego badanej cechy. W niniejszej pracy badanymi cechami statystycznymi jest szerokość wcięcia, długość wcięcia oraz średnica otworów. Na rysunkach 4.32 i 4.33 przedstawiono istotność cechy jaką jest wartość średnicy otworu na nośność połączenia klejowego dla próbek ze stali oraz próbek ze stopu aluminium. Wykres Boxplot, rys. 4.32, wykazuje iż żaden z wartości średnicy wykonanych otworów nie wywiera istotnego wpływu na wytrzymałość złącza w przypadku próbek stalowych. Widać wyraźnie jak pudełka wzajemnie zachodzą na siebie. Porównując wykres Boxplot, rys. 4.33 oraz wyniki analizy

wariancji zamieszczone powyżej można stwierdzić, iż w próbkach ze stopu aluminium wykazany jest istotny wpływ wartości wykonanego otworu w czołowej strefie zakładki na nośność połączenia klejowego.



Rys. 4. 32. Wykres Boxplot obrazujący wpływ średnicy wykonanego otworu na wytrzymałość połączeń klejowych dla próbek stalowych [opracowanie własne]



Rys. 4. 33. Wykres Boxplot obrazujący wpływ średnicy wykonanego otworu na wytrzymałość połączeń klejowych dla próbek ze stopu aluminium [opracowanie własne]

## 5. Badania zmęczeniowe

Badania zmęczeniowe przeprowadzono przy użyciu maszyny o napędzie hydraulicznym dedykowanej do badań dynamicznych HT-9711. W ramach badań zmęczeniowych wykorzystano przebieg sinusoidalny obciążenia o częstotliwości 30 Hz oraz współczynnik asymetrii cyklu równy  $R=0,1$ .

### 5.1 Wyniki badań zmęczeniowych dla próbek ze stali S235JR

W tabeli 5.1 przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych i analizy statycznej dla wariantu podstawowego połączenia klejowego bez wykonanych modyfikacji konstrukcyjnych na krawędzi klejonych próbek wykonanych ze stali S235JR. Natomiast w tabelach 5.2 – 5.4 przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych dla rozważanych wariantów z modyfikacjami poprzez wykonanie wcięcia na krawędzi czołowej połączenia klejowego. Analiza statyczna wykazała, że na każdym poziomie obciążenia cyklicznego dla wariantów ze zmianą konstrukcyjną w strefie przykrawędziowej uzyskano znacznie większe rozproszenie wyników w stosunku do wariantu bazowego. Podobnie jak w przypadku badań statycznych zaobserwowane zjawisko spowodowane jest nierównomiernym rozprowadzeniem kleju zwłaszcza w wypełnieniu nacięć oraz otworów klejem. Wpływ na powyższe ma także dokładność w wykonaniu modyfikacji w strefie czołowej złącza tj. wykonanie wcięć oraz otworów.

Tab. 5. 1. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia bazowego

Wartość amplitudy naprężenia [MPa]	Wartość dla poszczególnych próbek				
	11,5	10	9	8,5	8
Liczba cykli niszczących $N \times 10^3$	19,832	75,865	258,133	941,642	2000,000
	10,684	38,691	469,874	1646,310	2000,000
	8,312	65,894	298,416	1346,584	2000,000
	13,845	56,623	615,642	1005,479	2000,000
Logarytm liczby cykli $\lg N$	4,297	4,881	5,411	5,973	6,301
	4,028	4,587	5,671	6,216	6,301
	3,919	4,818	5,474	6,129	6,301
	4,141	4,752	5,789	6,002	6,301
Wartość średnia $\bar{N}$	13,168	59,268	410,516	1235,004	2000,000
Wartość średnia $\overline{\lg N}$	4,096	4,759	5,586	6,081	6,301
Odchylenie standardowe $s$	0,139	0,109	0,151	0,097	-
Współczynnik zmienności $W_s = \frac{s}{\overline{\lg N}} \cdot 100\%$	3,413%	2,292%	2,705%	1,610%	-
Wartość $t_\alpha$ dla poziomu ufności $p = 95\% (\alpha = 0.05)$	3,182	3,182	3,182	3,182	-
$t_\alpha \cdot s$	0,445	0,347	0,481	0,311	-
$\log N_{max}$	4,541	5,107	6,068	6,392	-
$N_{max} \times 10^3$ cykli	34,809	127,978	1169,634	2466,305	-
$\log N_{min}$	3,651	4,412	5,105	5,768	-
$N_{min} \times 10^3$ cykli	4,486	25,858	127,625	587,428	-
Wytrzymałość zmęczeniowa $Z_G$ [MPa]	8				
Równanie regresji liniowej krzywej zmęczeniowej	$\sigma = -1,368e^{-06}x + 10,417$				

Tab. 5. 2. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami szerokimi w wariancie SWD

Wartość amplitudy naprężenia [MPa]	Wartość dla poszczególnych próbek				
	13,5	11,5	10	9	8,5
Liczba cykli niszczących $N \times 10^3$	6,295	28,435	397,449	1831,764	2000,000
	12,107	53,176	214,698	1063,257	2000,000
	16,831	76,012	486,274	924,088	2000,000
	20,139	68,125	186,320	1368,932	2000,000
Logarytm liczby cykli $\lg N$	3,798	4,453	5,599	6,262	6,301
	4,083	4,725	5,331	6,026	6,301
	4,226	4,881	5,686	5,965	6,301
	4,304	4,833	5,271	6,136	6,301
Wartość średnia $\bar{N}$	13,843	56,437	321,185	1297,011	2000,000
Wartość średnia $\overline{\lg N}$	4,103	4,723	5,472	6,097	6,301
Odchylenie standardowe $s$	0,192	0,165	0,175	0,113	-
Współczynnik zmienności $W_s = \frac{s}{\overline{\lg N}} \cdot 100\%$	2,131%	2,854%	3,124%	5,387%	-
Wartość $t_\alpha$ dla poziomu ufności $p = 95\%$ ( $\alpha = 0.05$ )	3,182	3,182	3,182	3,182	-
$t_\alpha \cdot s$	0,612	0,526	0,557	0,361	-
$\log N_{max}$	4,715	5,251	6,029	6,458	-
$N_{max} \times 10^3$ cykli	51,989	177,832	1070,081	2871,239	-
$\log N_{min}$	3,491	4,196	5,914	5,737	-
$N_{min} \times 10^3$ cykli	3,091	15,734	82,169	546,678	-
Wytrzymałość zmęczeniowa $Z_G$ [MPa]	8,5				
Równanie regresji liniowej krzywej zmęczeniowej	$\sigma = -1,958e^{-06}x + 11,944$				

Tab. 5. 3. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami średnimi w wariancie SWS

Wartość amplitudy naprężenia [MPa]	Wartość dla poszczególnych próbek				
	15,5	11,5	10	9	8,5
Liczba cykli niszczących $N \times 10^3$	7,315	51,394	512,944	924,712	2000,000
	12,683	116,947	786,992	1284,563	2000,000
	5,047	102,916	495,873	803,647	2000,000
	16,471	84,024	694,583	728,408	2000,000
Logarytm liczby cykli $\lg N$	3,864	4,712	5,711	5,966	6,301
	4,103	5,067	5,895	6,108	6,301
	3,703	5,012	5,695	5,905	6,301
	4,216	4,928	5,841	5,862	6,301
Wartość średnia $\bar{N}$	10,379	88,821	622,598	935,332	2000,000
Wartość średnia $\overline{\lg N}$	3,971	4,928	5,785	5,961	6,301
Odchylenie standardowe $s$	0,201	0,135	0,085	0,093	-
Współczynnik zmienności $W_s = \frac{s}{\overline{\lg N}} \cdot 100\%$	1,979%	3,627%	6,774%	6,398%	-
Wartość $t_\alpha$ dla poziomu ufności $p = 95\% (\alpha = 0.05)$	3,182	3,182	3,182	3,182	-
$t_\alpha \cdot s$	0,638	0,432	0,271	0,296	-
$\log N_{max}$	4,611	5,361	6,057	6,256	-
$N_{max} \times 10^3$ cykli	40,767	229,809	1141,693	1807,051	-
$\log N_{min}$	3,333	4,496	5,514	5,664	-
$N_{min} \times 10^3$ cykli	2,154	13,371	326,601	461,456	-
Wytrzymałość zmęczeniowa $Z_G$ [MPa]	8,5				
Równanie regresji liniowej krzywej zmęczeniowej	$\sigma = -2,711e^{-06}x + 12,882$				

Tab. 5. 4. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami wąskimi w wariancie SWM

Wartość amplitudy naprężenia [MPa]	Wartość dla poszczególnych próbek				
	15,5	11,5	10	9	8,5
Liczba cykli niszczących $N \times 10^3$	13,065	60,994	719,234	1563,078	2000,000
	8,947	94,508	471,380	1864,566	2000,000
	10,871	81,356	841,037	1032,817	2000,000
	16,647	69,412	512,464	1697,846	2000,000
Logarytm liczby cykli $\lg N$	4,116	4,785	5,856	6,193	6,301
	3,951	4,975	5,673	6,271	6,301
	4,036	4,912	5,924	6,014	6,301
	4,221	4,841	5,709	6,229	6,301
Wartość średnia $\bar{N}$	12,383	76,568	636,029	1539,576	2000,000
Wartość średnia $\overline{\lg N}$	4,081	4,878	5,791	6,177	6,301
Odchylenie standardowe $s$	0,099	0,071	0,103	0,097	-
Współczynnik zmienności $W_s = \frac{s}{\overline{\lg N}} \cdot 100\%$	2,439%	1,467%	1,784%	1,586%	-
Wartość $t_\alpha$ dla poziomu ufności $p = 95\%$ ( $\alpha = 0.05$ )	3,182	3,182	3,182	3,182	-
$t_\alpha \cdot s$	0,316	0,227	0,328	0,311	-
$\log N_{max}$	4,398	5,105	6,119	6,488	-
$N_{max} \times 10^3$ cykli	25,013	127,597	1318,056	3082,549	-
$\log N_{min}$	3,764	4,651	5,462	5,865	-
$N_{min} \times 10^3$ cykli	5,814	44,714	290,018	733,381	-
Wytrzymałość zmęczeniowa $Z_G$ [MPa]	8,5				
Równanie regresji liniowej krzywej zmęczeniowej	$\sigma = -2,607e^{-06} x + 13,123$				

Jak widać z powyższych zestawień wyników badań zmęczeniowych dotyczących jednozakładowego połączenia klejowego zauważono, że przy założonej liczbie granicznej cykli równej  $2 \times 10^6$  cykli wytrzymałość dla każdego z wariantów z wcięciami wyniosła 8,5 MPa, w porównaniu do wytrzymałości zmęczeniowej wariantu podstawowego, która to dla  $2 \times 10^6$  cykli wyniosła 8 MPa.

Zaobserwowano, iż wprowadzenie modyfikacji polegającej na wykonaniu szerokich wcięć w elementach klejonych ma wpływ na zjawisko zmęczeniowe w zakresie niskocyklowego zmęczenia. Przy zadanym obciążeniu zmiennym o maksymalnej wartości 11,5 MPa w wariancie podstawowym połączenie klejowe osiągnęło wartość średniej trwałości zmęczeniowej równą  $13,168 \times 10^3$ , gdy w przypadku połączenia klejowego z wcięciami szerokimi średnia wartość trwałości zmęczeniowej wyniosła  $56,437 \times 10^3$ , co stanowi znaczny wzrost na poziomie ok. 328%. Dla tego typu zastosowanej modyfikacji w połączeniu klejowym

przy obciążeniu zmiennym o maksymalnej wartości 13,5 MPa, średnia wartość trwałości zmęczeniowej wyniosła  $13,843 \times 10^3$ . Wskazuje to nadal lepszy wynik w porównaniu do wariantu bazowego przy jego mniejszym obciążeniu zmiennym.

Połączenie klejowe z wcięciami średnimi osiągnęło średnią trwałość zmęczeniową równą  $88,821 \times 10^3$ , przy zadanej maksymalnej wartości obciążenia zmiennego równej 11,5 MPa, co stanowi znaczący wzrost w stosunku do wariantu bazowego, w którym średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $13,168 \times 10^3$ . Dla tej samej wartości obciążenia zmiennego, wzrost w porównaniu z wariantem bazowym przedkłada się na ok. 576%. W tym wariacie maksymalne obciążenie zmienne jakie zadano wynosiło 15,5 MPa, przy którym średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $10,379 \times 10^3$ . Dla tego poziomu maksymalnego obciążenia zmiennego próbka w wariacie z wcięciami wąskimi, osiągnęła średnią trwałość zmęczeniową równą  $12,382 \times 10^3$ . Tym samym, wykazano iż w przypadku niskocyklowego zmęczenia najlepszą średnią trwałość zmęczeniową ujawniono dla zastosowanych wcięć wąskich. Dla wariantu z wcięciami wąskimi średnia trwałość zmęczeniową przy zmiennym obciążeniu 11,5 MPa wyniosła  $76,567 \times 10^3$ , gdy dla wariantu bazowego średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $13,168 \times 10^3$ , co wskazuje na wzrost o ok. 681%. Wykazano tym samym znaczący wpływ zastosowanych zmian konstrukcyjnych na trwałość zmęczeniową w stosunku do wariantu podstawowego. Badania wykazały różnicę w porównaniu z wariantem podstawowym, a także różnice pomiędzy poszczególnymi wariantami przy tym samym zadanym obciążeniu, szczególnie istotny wpływ wykazano dla zmęczenia niskocyklowego. Wraz ze spadkiem poziomu obciążenia różnice w trwałości zmęczeniowej też są mniejsze. Biorąc pod uwagę ten wskaźnik dla obszaru zmęczenia wysokocyklowego, wyznaczono średnie wartości wytrzymałości zmęczeniowej dla naprężenia o wartości 9 MPa. W przypadku wysokocyklowego zmęczenia różnice nie są tak znaczące jednakże również ważne. Trwałość zmęczeniowa przy maksymalnym obciążeniu zmiennym równym 9 MPa, dla wariantu bazowego wyniosła  $410,516 \times 10^3$ , z kolei dla wariantu z wcięciami szerokimi wyniosła  $1297,011 \times 10^3$ . Daje to znaczny wzrost trwałości zmęczeniowej wariantu z wcięciami szerokimi w stosunku do wariantu bazowego o ok. 216%. Natomiast dla wariantu z wcięciami średnimi średnia trwałość zmęczeniowa dla tego samego naprężenia cyklicznego wyniosła  $935,332 \times 10^3$ , co oznacza wzrost w stosunku do bazowego o ok. 128%. Wariant z wcięciami wąskimi przy tym samym poziomie obciążenia zmiennego osiągnął średnią wartość trwałości zmęczeniowej równą  $1539,576 \times 10^3$ , co daje wzrost o 275% w stosunku do wariantu

podstawowego. Jak wynika z analiz powyżej, zakładając graniczną liczbę cykli równą  $2 \times 10^6$  wytrzymałość dla wariantu z wcięciami wyniosła 8,5 MPa podczas gdy dla wariantu bazowego 8 MPa. Dla wariantu bazowego średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $1235,004 \times 10^3$  przy zmiennym poziomie obciążenia o maksymalnej wartości 8,5 MPa. Niskocyklowe zmęczenie charakteryzuje się odmiennym mechanizmem pęknięcia niż wysokocyklowe.

Poniżej w tabeli 5.5 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości zmęczeniowej i analizy statycznej dla wariantu z wykonanymi otworami w strefie przykrawędziowej połączenia klejowego próbek wykonanych ze stali.

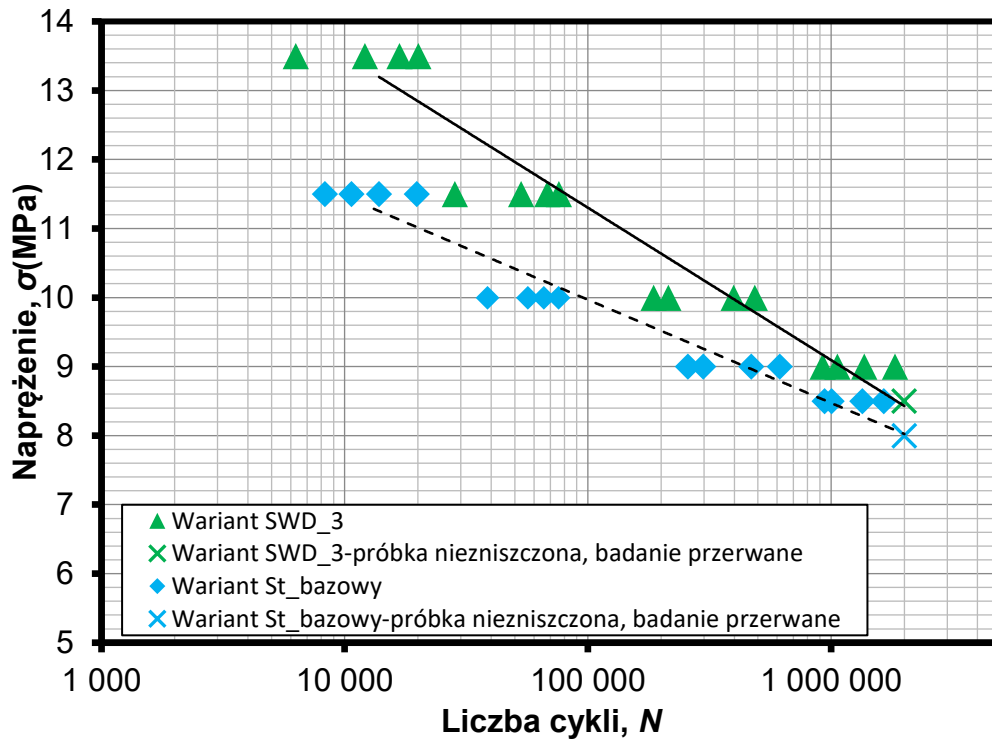
Tab. 5. 5. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z otworami w wariacie SO

Wartość amplitudy naprężenia [MPa]	Wartość dla poszczególnych próbek				
	13,5	11,5	10	9	8,5
Liczba cykli niszczących $N \times 10^3$	9,460	73,808	356,366	1119,949	2000,000
	15,824	51,767	482,021	793,645	2000,000
	4,685	90,812	152,048	1305,417	2000,000
	11,982	46,021	328,136	1432,654	2000,000
Logarytm liczby cykli $\lg N$	3,975	4,868	5,551	6,049	6,301
	4,199	4,714	5,683	5,899	6,301
	3,671	4,958	5,181	6,115	6,301
	4,078	4,662	5,516	6,156	6,301
Wartość średnia $\bar{N}$	10,488	65,602	329,643	1162,916	2000,000
Wartość średnia $\overline{\lg N}$	3,981	4,801	5,483	6,055	6,301
Odchylenie standardowe $s$	0,195	0,118	0,184	0,097	-
Współczynnik zmienności $W_s = \frac{s}{\overline{\lg N}} \cdot 100\%$	2,032%	4,064%	2,968%	6,204%	-
Wartość $t_\alpha$ dla poziomu ufności $p = 95\% (\alpha = 0.05)$	3,182	3,182	3,182	3,182	-
$t_\alpha \cdot s$	0,623	0,375	0,587	0,311	-
$\log N_{max}$	4,604	5,176	6,071	6,365	-
$N_{max} \times 10^3$ cykli	40,217	150,204	1177,636	2321,172	-
$\log N_{min}$	3,357	4,424	4,895	5,744	-
$N_{min} \times 10^3$ cykli	2,279	26,603	78,611	555,456	-
Wytrzymałość zmęczeniowa $Z_G$ [MPa]	8,5				
Równanie regresji liniowej krzywej zmęczeniowej	$\sigma = -1,99e^{-06}x + 11,921$				

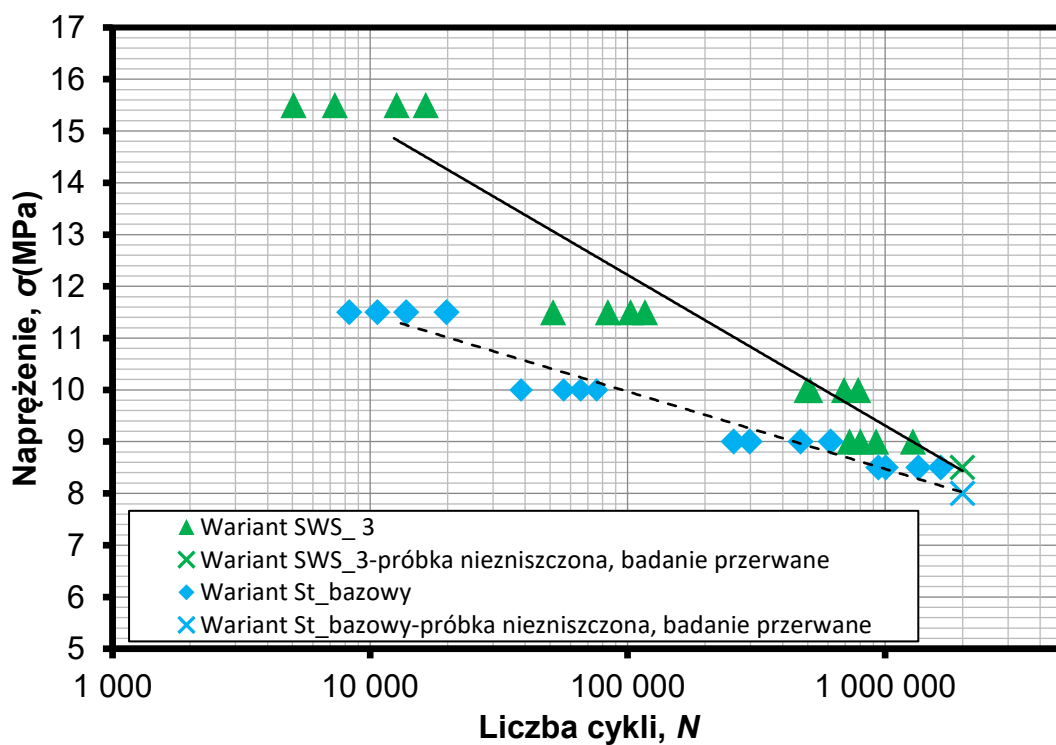
Zaobserwowano istotny wpływ zastosowanych modyfikacji w geometrii zakładki, polegającej na wykonaniu otworów w strefie czołowej złącza, na zjawisko zmęczeniowe w jednozakładowym połączeniu klejowym. Dla obciążenia zmiennego o maksymalnej wartości równej 11,5 MPa połączenie klejowe w wariacie podstawowym osiągnęło średnią trwałość zmęczeniową równą  $13,168 \times 10^3$ , w przypadku gdy w wariacie z otworami średnia wartość trwałości zmęczeniowej wyniosła  $65,602 \times 10^3$ . Jest to wzrost o ok. 398 % w stosunku do

wariantu bazowego. Próbki połączeń klejowych z otworami poddano badaniom przy maksymalnym poziomie naprężenia cyklicznego wynoszącego 13,5 MPa, w których średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $10,487 \times 10^3$ . z kolei analizując różnice w trwałości zmęczeniowej dla obszaru wysokocyklowego jak w przypadku wcięć, dla naprężenia cyklicznego wynoszącego 9 MPa, średnia trwałość zmęczeniowa dla otworów wyniosła  $1162,916 \times 10^3$ . Jest to wzrost o 183 % w stosunku do wariantu podstawowego, w którym średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $410,516 \times 10^3$ . Jednak w przypadku wariantu z otworami wytrzymałość zmęczeniowa przy założonej liczbie granicznej cykli równej  $2 \times 10^3$  wyniosła 8,5 MPa, tak samo jak w przypadku modyfikacji z wcięciami, natomiast dla wariantu podstawowego wyniosła ona 8 MPa. Przytoczone wyniki potwierdzają, że proste modyfikacje konstrukcyjne, jakimi są wykonanie wcięć czy otworów, mogą w znaczący sposób spowodować poprawę właściwości zmęczeniowych połączeń klejowych. Istotny wpływ w wystosowanych zmianach geometrycznych ma fakt, iż są one wykonane w czołowej strefie elementów klejonych, czyli w obszarze gdzie występuje duża koncentracja naprężeń.

Analizując wpływ zastosowanych zmian geometrycznych w strefie przykrawędziowej na właściwości zmęczeniowe połączeń klejowych można wysunąć szereg wniosków poprzez porównanie krzywych zmęczeniowych dla wariantów z wcięciami, z otworami oraz bez modyfikacji. Wprowadzenie wcięć w elementach klejonych ma największy wpływ na zjawiska zmęczeniowe połączenia w zakresie niskocyklowego zmęczenia. Na każdym poziomie maksymalnego obciążenia cyklicznego dla wariantów z modyfikacjami w porównaniu z wariantem bazowym zaobserwowano istotny wpływ trwałości zmęczeniowej. Te zauważalne zmiany trwałości zmęczeniowej można dostrzec, gdy zmiana geometrii w strefie przykrawędziowej dotyczy wykonania wcięć lub otworów, o czym świadczą przedstawione wyniki oraz opracowane i przedstawione poniżej krzywe zmęczenia, rys. 5.1 – rys. 5.4. Niskocyklowe zmęczenie cechuje się odmiennym mechanizmem pęknięcia niż wysokocyklowe. W przypadku niskocyklowego zmęczenia z każdym cyklem dochodzi do znaczących odkształceń w obszarze połączenia. Potencjalnie wcięcia wypełnione klejem pochłaniają część energii odkształcenia, stąd mogło dojść do wzrostu trwałości zmęczeniowej.



Rys. 5. 1. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z wcięciami szerokimi SWD o długości 3 mm [opracowanie własne]



Rys. 5. 2. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z wcięciami średnimi SWS o długości 3 mm [opracowanie własne]

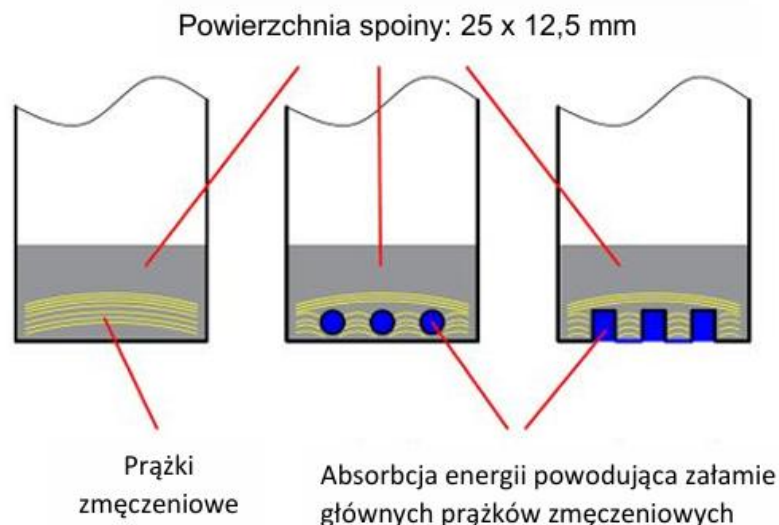


Przedstawione krzywe zmęczenia dla wariantu bazowego i wariantów z modyfikacjami wykazują istotne różnice pomiędzy zastosowanymi modyfikacjami. Na rysunku 5.1 przedstawiono krzywe zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z wcięciami szerokimi. Zaobserwowano istotny wpływ dla zastosowanych zmian konstrukcyjnych w strefie czołowej złącza na trwałość zmęczeniową. Szczególnie istotny wpływ wykazano dla zmęczenia niskocyklowego. Porównując trwałość zmęczeniową przy zmiennym poziomie obciążenia 11,5 MPa wariantu podstawowego, z trwałością zmęczeniową dla wariantu z wcięciami szerokimi przy tym samym obciążeniu zaobserwowano znaczny wzrost liczby cykli, krzywe są od siebie bardzo oddalone, kąt nachylenia jest dużo większy w przypadku krzywej zmęczenia dla wariantu z wcięciami w stosunku do krzywej zmęczenia wariantu bazowego. Z kolei dla wariantu z wcięciami średnimi, rys. 5.2, przedstawia krzywa zmęczenia w porównaniu z wariantem bazowym również charakteryzuje się znacznie większą liczbą cykli dla tych samych wartości maksymalnego obciążenia zmiennego. Tutaj wyraźnie można zaobserwować znaczną różnicę wartości naprężenia cyklicznego dla liczby cykli na poziomie ok. 10 000. Kąt nachylenia krzywej jest większy w porównaniu z krzywą w wariacie bazowym, krzywe są od siebie znacznie oddalone. Rysunek 5.3, obrazuje porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z wcięciami wąskimi o znacznie mniej rozproszonych wynikach niż w poprzednich przypadkach. Krzywa zmęczenia w wariacie z wcięciami wąskimi jest również oddalona od krzywej wariantu bazowego o czym świadczą większe wyniki średniej trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych wartości naprężenia cyklicznego. Znaczący wpływ na trwałość zmęczeniową zaobserwowano również w przypadku wariantu z otworami. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z otworami przedstawiono na rysunku 5.4. Dla tej wersji modyfikacji trwałość zmęczeniowa przy zmiennym poziomie obciążenia nie jest tak wysoka jak w przypadku wcięć, lecz równie pozytywnie wpływa na połączenie klejowe w porównaniu z wersją podstawową połączenia klejowego. Dla każdego z zastosowanych wariantów modyfikacji próbki połączenia klejowego można wyraźnie zauważyć znaczny wzrost wytrzymałości zmęczeniowej w porównaniu z wariantem bazowym. Dzieje się tak na każdym poziomie obciążenia cyklicznego. Jednakże na przedstawionych krzywych zmęczenia dla zastosowanych modyfikacji znaczący wpływ jest widoczny dla niskocyklowego zmęczenia. Wraz ze spadkiem poziomu obciążenia różnice w trwałości zmęczeniowej są mniejsze, co potwierdzają przedstawione wyniki na wykresach krzywych zmęczeniowych. Dla wszystkich przypadków wysokocyklowego zmęczenia wyniki średniej

trwałości zmęczeniowej są mniej zróżnicowane w stosunku do wariantu bazowego co wyraźnie widać na przedstawionych krzywych zmęczeniowych.

Analiza statyczna oraz wskazane wykresy krzywych zmęczeniowych rozważanych połączeń klejowych poddanych wysokocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej z ograniczoną liczbą cykli równą  $2 \times 10^6$  wykazały na każdym poziomie obciążenia cyklicznego w znacznym stopniu większe rozproszenie wyników dla wariantów ze zmianami geometrycznymi w czołowej części złącza w stosunku do wariantu podstawowego. Na podstawie przedstawionych krzywych zmęczenia różnych wariantów połączeń klejowych w zestawieniu z wariantem bazowym zaobserwowano istotny wpływ zastosowanych zmian konstrukcyjnych na trwałość zmęczeniową. Zaobserwowane zjawisko potwierdza, że proste modyfikacje konstrukcyjne mogą w znacznym stopniu przyczynić się do poprawy właściwości zmęczeniowych konstrukcyjnych połączeń klejowych.

Występujące różnice w sposobie pęknięcia wskazują, że cykliczne odkształcenia kleju wypełniającego nacięcia i otwory pochłaniają pewną ilość energii, co przekłada się na ograniczenie rozprzestrzeniania się pęknięć zmęczeniowych występujących we właściwej warstwie kleju pomiędzy klejonymi elementami. Właściwa warstwa kleju jest to pole powierzchni spoiny, które jest dla każdego wariantu takie samo i wynosi  $25 \times 12,5$  mm. Dla wariantów z wykonanymi modyfikacjami geometrycznymi wskazana powierzchnia zawiera wcięcia i otwory. W rozważanym uprzednio zakresie niniejszej pracy a mianowicie analizie obciążeń statycznych zjawisko to nie jest istotne. Rozproszenie energii w dodatkowej objętości kleju tj. w wcięciach i otworach ma znikomy wpływ poddając złącze pod pojedyncze obciążenie statyczne. W przypadku analizy statycznej obciążenie jest przenoszone przez całą powierzchnię złącza, która przy jednokrotnym obciążeniu pęka po przekroczeniu granicznej wytrzymałości statycznej. Natomiast, badając zjawisko wytrzymałości zmęczeniowej, gdzie występuje zjawisko histerezy obciążenia, najbardziej obciążony jest obszar na krawędzi połączenia klejowego. Tam właśnie w wykonanych otworach i wcięciach znajduje się dodatkowa objętość kleju, która pozwala na częściowe rozproszenie energii podczas obciążenia cyklicznego. Proces pęknięcia zmęczeniowego inicjowany jest w strefie przykrawędziowej połączenia klejowego, co jest zgodne z rozkładem naprężeń wykazującym koncentrację na krawędziach złącza. Na rysunku 5.5 poniżej przedstawiono schemat pęknięcia zmęczeniowego połączenia kolejowego dla rozważanych wariantów: bez modyfikacji, z wcięciami i z otworami.



Rys. 5. 5. Schemat mechanizmu pękania zmęczeniowego połączenia klejowego dla złącza bez modyfikacji, z wykonanymi wcięciami oraz z wykonanymi otworami [119]

Na podstawie wcześniejszych prac autorów Kubit, Zielecki i inni [119] wykazano, że pękanie zmęczeniowe rozprzestrzenia się od krawędzi natarcia złącza poprzez postępujące równoległe prążki zmęczeniowe na przełomie zmęczeniowym. Ten mechanizm pękania zmęczeniowego widoczny na rysunku 5.5 wskazuje, iż rozprzestrzenianie się pękania zmęczeniowego w przypadku próbki w wariancie podstawowym postępuje począwszy od krawędzi równoległe w głąb połączenia równomiernie na całej jego szerokości.

Wprawdzie wyniki niniejszych doświadczeń nie wykazały na przedstawionych poniżej przełamach zmęczeniowych tak wyraźnych prążków zmęczeniowych, ponieważ zastosowany klej ma nie co inne właściwości. Jednakże dotychczasowe doświadczenia oraz badania wskazują, aby przyjąć hipotezę zgodnie z przedstawionym powyżej schematem. Wyraźnie zaznaczone prążki zmęczeniowe inicjowane są na krawędzi złącza.

## 5.2 Wyniki analizy makroskopowej próbek ze stali S235JR

Powyższe rozważania dotyczące wpływu zastosowanych wcięć w geometrię elementów klejonych na poprawę trwałości zmęczeniowej potwierdzono dokonując analiz fotograficznych dla wybranych wariantów rozważanych połączeń klejowych.

Głównym narzędziem wykorzystanym w tym badaniu był skaningowy mikroskop elektronowy PhenomProX (rys. 5.6). Skaningowy mikroskop elektronowy PhenomProX został zaprojektowany do szybkiego i niezwykle prostego zbierania najwyższej, jakości obrazów elektronowych o powiększeniach do 150 000x oraz realnej rozdzielczości poniżej 8nm<sup>1</sup>. Mikroskop ten, od momentu umieszczenia próbki w komorze mikroskopu, do uzyskania pierwszego obrazu elektronowego, potrzebuje jedynie 30 sekund. Mikroskop PhenomProX wyposażony jest w spektrometr EDS (typu SDD), posiada możliwość analizy pierwiastkowej badanych materiałów. Ponadto można zastosować wiele uchwytów próbek m.in. z automatycznym pochyłem i obrotem czy też z funkcją kontroli temperatury. Mikroskop ten charakteryzuje się bardzo wydajnym źródłem elektronów CeB6 gwarantującym duży stosunek sygnału do szumu oraz wysoką zdolność rozdzielczą [69].



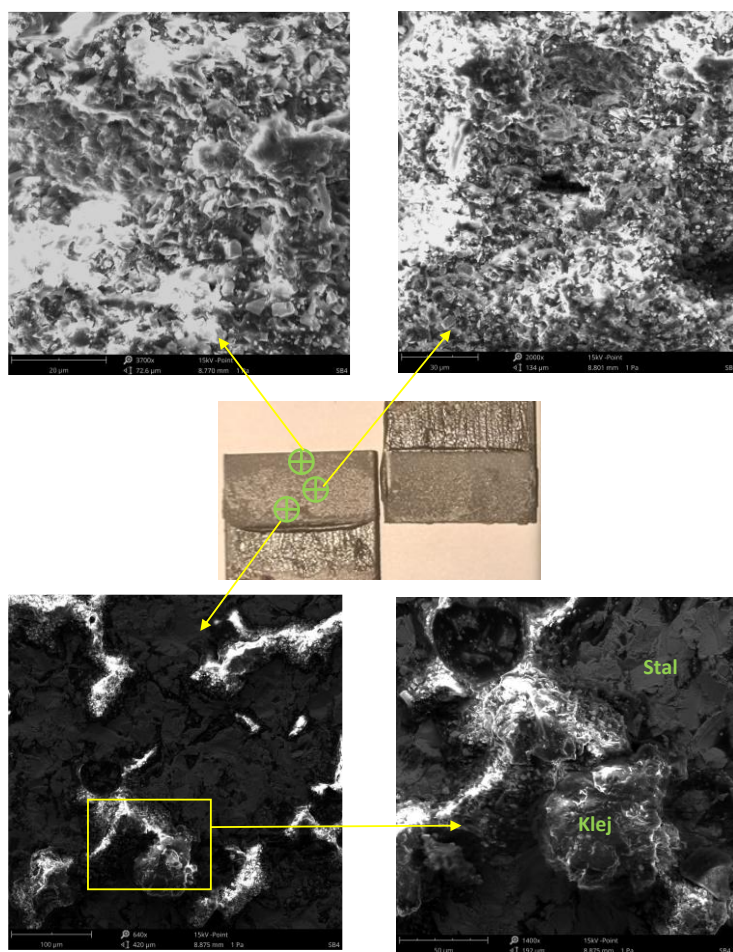
Rys. 5. 6. Skaningowy mikroskop elektronowy PhenomProX [opracowanie własne]

Na rysunku 5.6 przedstawiono widok makroskopowy oraz SEM wybranych obszarów przelomu zmęczeniowego połączenia wariantu bazowego, które uległo zniszczeniu po  $10,684 \times 10^3$  cyklach przy obciążeniu zmiennym o maksymalnej wartości równej 11,5 MPa. Na bazie widoku przelomu zmęczeniowego w skali makroskopowej można zaobserwować trzy

---

<sup>1</sup>Dzięki powiększeniu do 150 000x i realnej rozdzielczości poniżej 8nm, mikroskop ten umożliwia szybkie i precyzyjne badanie struktury klejów i materiałów klejonych.

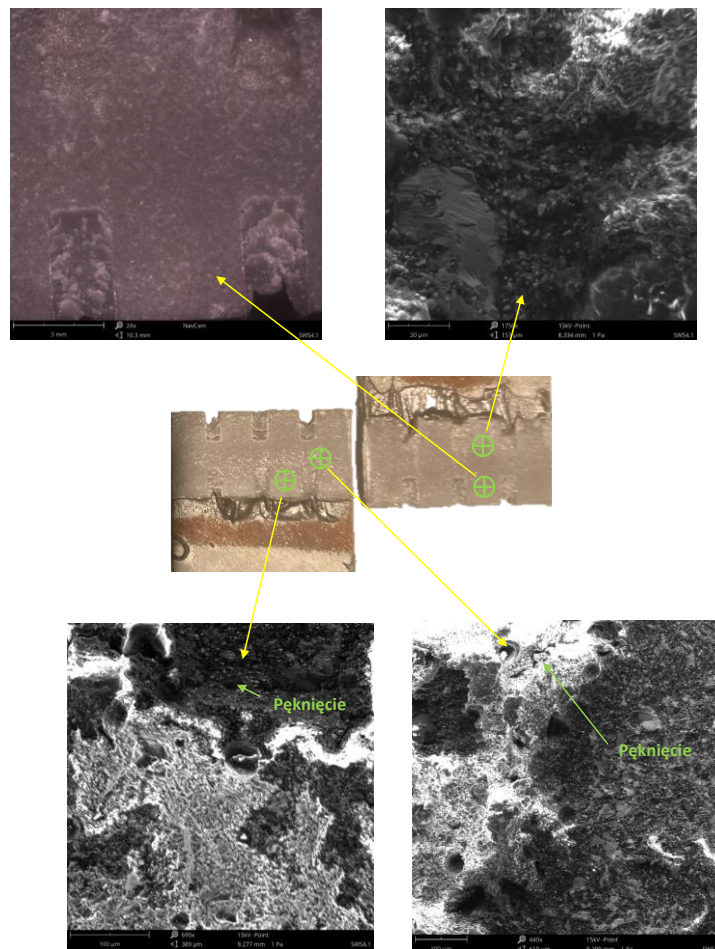
charakterystyczne strefy zmęczenia. Przy krawędziach czołowych połączenia w przeważającej części doszło do zniszczenia adhezyjnego, przy czym substancja klejowa pozostała przy krawędzi na obu elementach klejonych. Środkowy obszar przełomu ma charakter zniszczenia kohezyjnego, natomiast obszar przełomu od strony działającego obciążenia ma charakter zniszczenia adhezyjnego przy czym klej został usunięty z tego obrębu, gdyż pozostał on na powierzchni drugiego elementu. Analizując przełomy w skali makroskopowej na podstawie obrazów SEM, począwszy od krawędzi blachy w obszarze zniszczenia adhezyjnego zaobserwować można zniszczoną warstwę kleju o charakterze kruchym, co jest typowe dla tworzyw duroplastycznych. Charakter zniszczenia w tym obrębie może świadczyć o tym, że nie doszło tutaj jednak do typowego adhezyjnego zniszczenia, jak pierwotnie twierdzono na podstawie analiz makroskopowych. Na kruchy charakter przełomu wskazuje fakt, że klej pozostał na drugim elemencie klejowym. Fakt ten potwierdzają obrazy SEM wykonane na przełomie od strony działającego obciążenia. Widać tu wprawdzie odsłoniętą warstwę metalu, jak również pozostałości kleju, co świadczy o zniżeniu adhezyjno-kohezyjnym. Patrząc na środkowy obszar połączenia, gdzie wykazano zniszczenie kohezyjne, mikrografia SEM potwierdza ten charakter zniszczenia obrazując kruchy przełom w warstwie kleju.



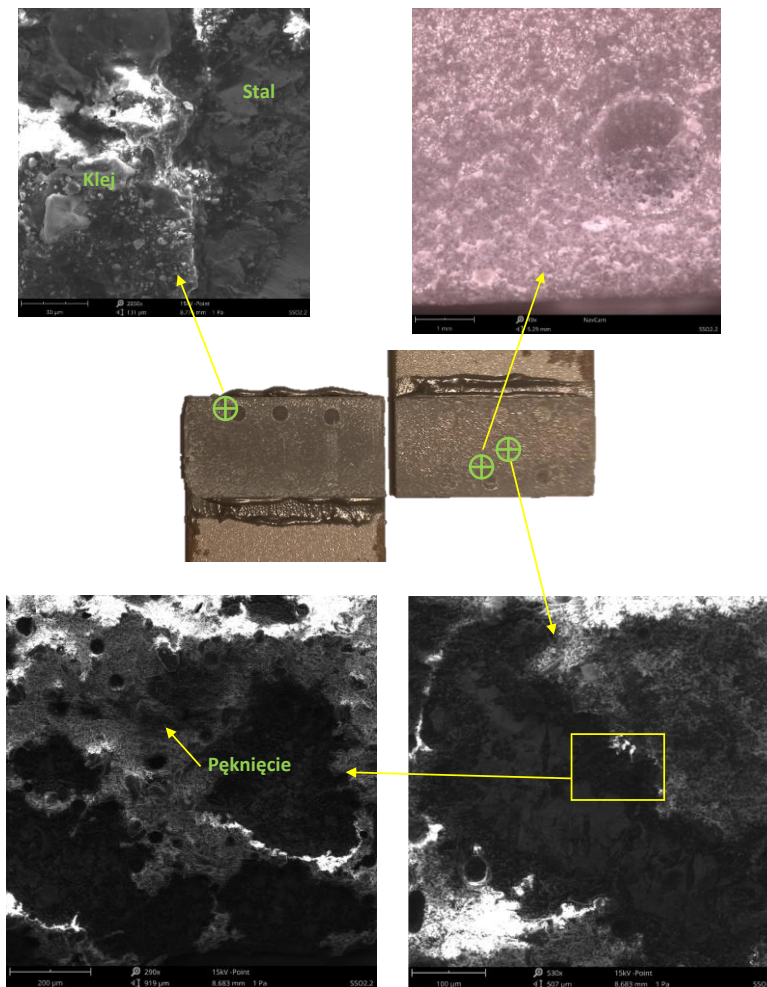
Rys. 5. 7. Powierzchnie pęknięć jednozakładowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego próbek ze stali S235JR [opracowanie własne]

Analiza przełomu zmęczeniowego połączenia z wcięciami, przedstawia połączenie klejowe, które uległo zniszczeniu zmęczeniowemu po  $9,783 \times 10^3$  cyklach przy obciążeniu zmiennym o maksymalnej wartości równej 15,5 MPa. Na rysunku 5.7 przedstawiono widok makroskopowy przełomu zmęczeniowego obydwu elementów klejonych oraz mikrografie SEM wybranych obszarów. Na podstawie widoku makroskopowego można zauważyć, że przełom jest w tym przypadku jednolity w porównaniu z analizowanym przełomem wariantu bazowego. Zdecydowanie na całej powierzchni przełomu doszło do zniszczenia kohezyjnego, co jest pożądane w przypadku połączeń klejowych. Zaledwie niewielkie obszary wykazują lokalnie charakter zniszczenia adhezyjno-kohezyjnego. Mikrografie SEM skupiają się na krawędziach wcięć elementów klejowych. W obszarze wcięcia wypełnionego klejem oraz powierzchni blachy zaobserwować można odmienny charakter zniszczenia. W obrębie wcięcia klej wypełniający przestrzeń stanowi obszar o większej sprężystości. Dzieje się tak, gdyż

z każdym cyklem zmęczeniowym odkształceniu w tym obszarze ulega cała objętość kleju znajdującego się we wcięciu. Jest to objętość kleju o grubości porównywalnej z grubością klejonej blachy, tj. 2 mm. Z kolei w zasadniczym połączeniu grubość warstwy substancji klejowej wynosi jedynie około 0,1 mm. Różnice w charakterze odkształcenia kleju wypełniającego wcięcia oraz warstwy kleju pomiędzy blachami można zaobserwować także na podstawie pojawiających się pęknięć kleju przy krawędziach wcięć, które są widoczne na obrazach SEM. Występowanie tych pęknięć jest spowodowane tym, że cykliczne odkształcenia kleju wypełniającego wcięcia pochłaniają pewną część energii, mogąc tym samym wpływać na zahamowanie pęknięć zmęczeniowych zachodzących ze właściwej warstwy substancji klejowej pomiędzy elementami. Mikrografie SEM uwidaczniają również znaczącą ilość pęcherzy powietrza w kleju wypełniającym wcięcia.



Rys. 5. 8. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariancie z wcięciami średnimi o szerokości 2 mm i długości 4 mm próbek ze stali S235JR [opracowanie własne]



Rys. 5. 9. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariancie z otworami o średnicy 2 mm próbek ze stali S235JR [opracowanie własne]

Analizując przełomy zmęczeniowe próbek, które uległy zniszczeniu w obszarze wysokocyklowego zmęczenia można zauważyć na ich powierzchniach uskoki zmęczeniowe. Na rysunku 5.7 przedstawiono powierzchnię przełomu zmęczeniowego połączenia w wariancie podstawowym, które uległo zniszczeniu po  $615,642 \times 10^3$  cyklach obciążenia o maksymalnej wartości równej 9 MPa. Można tu zaobserwować zapoczątkowane przy krawędzi blachy uskoki pęknięć zmęczeniowych. Zachodzą one równomiernie postępując równoległe od krawędzi blachy. Po osiągnięciu przez pęknięcie pewnej krytycznej wielkości, dochodzi do zmniejszenia efektywnej powierzchni połączenia, a tym samym do jej osłabienia. Skutkuje to doraźnym pęknięciem osłabionego przekroju.

Poddając analizie przełom zmęczeniowy wysokocyklowego połączenia z wcięciami, rozważono połączenie, które uległo zniszczeniu po  $719,234 \times 10^3$  cyklach obciążenia o wartości

maksymalnej równej 10 MPa. Obszar przelomu pomiędzy wcięciami przedstawiony na rysunku 5.8 przedstawia charakterystyczne uskoki zmęczeniowe. Intensywność tych uskoków na próbce jest znacząco większa niż w obszarze wcięć, co wyraźnie widać na rysunku 5.8. Jest to potwierdzeniem wcześniejszej tezy, że klej wypełniający wcięcia, dzięki znacząco większej grubości niż warstwa kleju stanowiąca zasadnicze połączenie cechuje się większą sprężystością. Przyczynia się to do wolniejszego postępowania pęknięcia zmęczeniowego lokalnego w tych obszarach. Dzięki temu, iż pewna część energii odkształcenia z każdym cyklem pochłaniana jest przez odkształcenia sprężyste objętości kleju wypełniającego wcięcia hamowana jest intensywność pęknięcia zmęczeniowego w zasadniczej warstwie kleju.

Na podstawie widoku przelomu zmęczeniowego rysunku 5.9 dostrzec można, że w obszarze wcięć może dojść do różnego charakteru zniszczenia. W rozważanym przypadku można dostrzec patrząc od krawędzi blachy, iż w czołowej części wcięć doszło do zniszczenia kohezyjnego. Natomiast w końcowej części wcięć doszło do zniszczenia adhezyjnego. Ten odmienny charakter zniszczenia może świadczyć o tym, że pęknięcie zmęczeniowe postępowало od krawędzi blachy do obszaru w którym zaobserwowano zniszczenie kohezyjne. z kolei obszar zniszczenia adhezyjnego może świadczyć o doraźnym pęknięciu osłabionego przekroju połączenia klejowego.

### **5.3 Wyniki badań zmęczeniowych dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3**

Podobnie jak dla próbek wykonanych ze stali przeprowadzono badania zmęczeniowe dla próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. Wyniki badań zmęczeniowych i analizy statycznej dla wariantu podstawowego przedstawiono w tabeli 5.6, z kolei w tabelach 5.7 – 5.9 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej dla wybranych próbek, w których dokonano modyfikacji poprzez wykonanie wcięć w strefie czołowej połączenia klejowego. Przeprowadzana analiza wykazała, znaczne rozproszenie wyników poprzez zadane obciążenie cykliczne w stosunku do bazowego. Tak samo jak w poprzednich przypadkach zaobserwowano nierównomierne rozprowadzenie kleju oraz jego umiejscowienie w wykonanych otworach i wcięciach.

Tab. 5. 6. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia bazowego

Wartość amplitudy naprężenia [MPa]	Wartość dla poszczególnych próbek				
	7,5	7	6,5	6	5
Liczba cykli niszczących $N \times 10^3$	7,895	18,310	175,392	963,683	2000,000
	4,124	29,536	128,463	741,685	2000,000
	28,60	37,422	230,173	790,321	2000,000
	1,853	24864	198,343	1096,432	2000,000
Logarytm liczby cykli $\lg N$	3,897	3,897	5,244	5,983	6,301
	3,615	3,615	5,108	5,870	6,301
	3,456	3,456	5,362	5,897	6,301
	3,267	3,267	5,297	6,039	6,301
Wartość średnia $\bar{N}$	4,183	27,533	183,093	898,031	2000,000
Wartość średnia $\overline{(\lg N)}$	3,559	4,425	5,253	5,947	6,301
Odchylenie standardowe $s$	0,231	0,113	0,093	0,067	-
Współczynnik zmienności $W_s = \frac{s}{\overline{(\lg N)}} \cdot 100\%$	6,482%	2,556%	1,775%	1,136%	-
Wartość $t_\alpha$ dla poziomu ufności $p = 95\% (\alpha = 0.05)$	3,182	3,182	3,182	3,182	-
$t_\alpha \cdot s$	0,734	0,361	0,296	0,215	-
$\log N_{max}$	4,293	4,785	5,549	6,163	-
$N_{max} \times 10^3$ cykli	19,652	610,19	354,514	1456,589	-
$\log N_{min}$	2,821	4,065	4,956	5,732	-
$N_{min} \times 10^3$ cykli	0,668	11,625	90,468	540,297	-
Wytrzymałość zmęczeniowa $Z_G$ [MPa]	5				
Równanie regresji liniowej krzywej zmęczeniowej	$\sigma = -1,074e^{-6} x + 7,069$				

Tab. 5. 7. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami szerokimi w wariancie AWD

Wartość amplitudy naprężenia [MPa]	Wartość dla poszczególnych próbek				
	8,5	7,5	7	6,5	6
Liczba cykli niszczących $N \times 10^3$	18,277	33,332	248,176	1058,264	2000,000
	9,163	66,018	115,932	1203,327	2000,000
	8,352	47,829	308,563	941,980	2000,000
	12,948	79,257	178,331	1632,784	2000,000
Logarytm liczby cykli $\lg N$	4,261	4,522	5,394	6,024	6,301
	3,962	4,819	5,064	6,081	6,301
	3,921	4,679	5,489	5,974	6,301
	4,112	4,899	5,251	6,212	6,301
Wartość średnia $\bar{N}$	12,185	56,609	212,751	1209,089	2000,000
Wartość średnia $\overline{(\lg N)}$	4,064	4,731	5,299	6,073	6,301
Odchylenie standardowe $s$	0,134	0,143	0,161	0,089	-
Współczynnik zmienności $W_s = \frac{s}{\lg N} \cdot 100\%$	3,301%	3,027%	3,024%	1,487%	-
Wartość $t_\alpha$ dla poziomu ufności $p = 95\% (\alpha = 0.05)$	3,182	3,182	3,182	3,182	-
$t_\alpha \cdot s$	0,427	0,455	0,511	0,283	-
$\log N_{max}$	4,491	5,186	5,812	6,356	-
$N_{max} \times 10^3$ cykli	31,025	153,478	645,684	2272,852	-
$\log N_{min}$	3,637	4,274	4,789	5,789	-
$N_{min} \times 10^3$ cykli	4,337	18,818	61,623	615,748	-
Wytrzymałość zmęczeniowa $Z_G$ [MPa]	6				
Równanie regresji liniowej krzywej zmęczeniowej	$\sigma = -9,458e^{-7} x + 7,761$				

Tab. 5. 8. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami średnimi w wariancie AWS

Wartość amplitudy naprężenia [MPa]	Wartość dla poszczególnych próbek				
	8,5	7,5	7	6,5	5,5
Liczba cykli niszczących $N \times 10^3$	5,243	5,243	124,589	124,589	2000,000
	9,075	9,075	200,285	200,285	2000,000
	3,811	3,811	183,641	183,641	2000,000
	7,942	7,942	260,926	260,926	2000,000
Logarytm liczby cykli $\lg N$	3,719	4,471	4,471	4,471	6,301
	3,957	4,575	4,575	4,575	6,301
	3,581	4,277	4,277	4,277	6,301
	3,899	4,379	4,379	4,379	6,301
Wartość średnia $\bar{N}$	6,517	27,552	192,361	875,499	2000,000
Wartość średnia $\overline{\lg N}$	3,789	4,426	5,269	5,936	6,301
Odchylenie standardowe $s$	0,149	0,112	0,115	0,069	-
Współczynnik zmienności $W_s = \frac{s}{\overline{\lg N}} \cdot 100\%$	3,933%	2,491%	2,184%	1,168%	-
Wartość $t_\alpha$ dla poziomu ufności $p = 95\% (\alpha = 0.05)$	3,182	3,182	3,182	3,182	-
$t_\alpha \cdot s$	0,474	0,351	0,366	0,221	-
$\log N_{max}$	4,263	4,777	5,635	6,157	-
$N_{max} \times 10^3$ cykli	18,362	59,846	432,061	1437,424	-
$\log N_{min}$	3,315	4,075	4,903	5,715	-
$N_{min} \times 10^3$ cykli	2,066	11,897	80,031	519,919	-
Wytrzymałość zmęczeniowa $Z_G$ [MPa]	5,5				
Równanie regresji liniowej krzywej zmęczeniowej	$\sigma = -1,185e^{-6} x + 7,735$				

Tab. 5. 9. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami wąskimi w wariancie AWM

Wartość amplitudy naprężenia [MPa]	Wartość dla poszczególnych próbek				
	7,5	7	6,5	6	5
Liczba cykli niszczących $N \times 10^3$	12,876	64,312	293,601	1195,023	2000,000
	9,374	57,634	260,995	1036,745	2000,000
	7,169	71,097	233,343	1361,873	2000,000
	8,024	53,671	217,094	1289,624	2000,000
Logarytm liczby cykli $\lg N$	4,109	4,808	5,467	6,077	6,301
	3,971	4,761	5,416	6,015	6,301
	3,855	4,851	5,367	6,134	6,301
	3,904	4,729	5,336	6,111	6,301
Wartość średnia $\bar{N}$	9,361	61,678	251,258	1220,816	2000,000
Wartość średnia $\lg N$	3,961	4,787	5,397	6,084	6,301
Odchylenie standardowe $s$	0,095	0,046	0,049	0,044	-
Współczynnik zmienności $W_s = \frac{s}{\lg N} \cdot 100\%$	2,415%	0,971%	0,921%	0,732%	-
Wartość $t_\alpha$ dla poziomu ufności $p = 95\% (\alpha = 0.05)$	3,182	3,182	3,182	3,182	-
$t_\alpha \cdot s$	0,304	0,147	0,158	0,141	-
$\log N_{max}$	4,264	4,935	5,555	6,226	-
$N_{max} \times 10^3$ cykli	18,397	86,185	359,223	1682,886	-
$\log N_{min}$	3,656	4,639	5,239	5,942	-
$N_{min} \times 10^3$ cykli	4,529	43,636	173,441	876,535	-
Wytrzymałość zmęczeniowa $Z_G$ [MPa]	5				
Równanie regresji liniowej krzywej zmęczeniowej	$\sigma = -1,055e^{-6x} + 7,148$				

Z powyższych zestawień wyników wytrzymałości zmęczeniowej jednozakładkowego połączenia kolejowego, porównując wariant bazowy z wariantami ze zmienioną geometrią strefy przykrawędziowej zaobserwowano, że przy założonej liczbie cykli odpowiadającej  $2 \times 10^6$  wytrzymałość dla wariantów z wcięciami jest większa. Nieznacznie większa dla wariantu z wcięciami średnimi, tj. 5,5 MPa, dla wcięć szerokich wynosiła 6 MPa, natomiast dla wariantu z zastosowanymi wcięciami wąskimi, wyniki wskazują, że nie uległa zmianie.

Poddając dalszej analizie wyniki badań zmęczeniowych można stwierdzić, że wprowadzenie modyfikacji szerokich oraz średnich wcięć ma wpływ na zjawisko zmęczeniowe połączenia klejowego w zakresie niskocyklowego zmęczenia. Dla wariantu podstawowego średnia wartość trwałości zmęczeniowej przy obciążeniu zmiennym o maksymalnej wartości 7,5 MPa wynosiła  $4,183 \times 10^3$ , gdy dla wariantu z wcięciami szerokimi średnia trwałość zmęczeniowa osiągnęła wartość  $56,609 \times 10^3$  dla tej samej wartości obciążenia zmiennego.

z kolei połączenia w wariacie z wcięciami średnimi dla obciążenia zmiennego o maksymalnej wartości 7,5 MPa wykazały średnią trwałość zmęczeniową równą  $27,552 \times 10^3$ , gdy dla tej samej wartości obciążenia zmiennego próbki z wcięciami wąskimi osiągnęły średnią trwałość zmęczeniową równą  $9,361 \times 10^3$ . z przedstawionych wartości można łatwo stwierdzić, że w każdym z przypadków ingerencja w geometrię w strefie przykrawędziowej zakładki połączenia klejowego daje zwiększenie wartości, a w najlepszym badanym przypadku jest to wzrost o ok. 1253% dla zastosowanych wcięć szerokich. Dla wcięć w wariacie średnim jest to poprawa do poziomu ok. 558% w stosunku do wariantu podstawowego, natomiast dla wariantu z wcięciami wąskimi jest to ok. 123% więcej.

Połączenie klejowe z wcięciami szerokimi osiągnęło maksymalną wartość obciążenia zmiennego równą 8,5 MPa, które uległo zniszczeniu po średnio  $12,185 \times 10^3$  cyklach. Kolejne badane połączenia klejowe w wariacie z wcięciami średnimi przy maksymalnym ich obciążeniu zmiennym osiągnęły wartość średniej trwałości zmęczeniowej wynoszącą  $6,517 \times 10^3$ . Na tej podstawie można stwierdzić, że najlepszym sposobem poprawy wytrzymałości zmęczeniowej połączenia klejowego jest zastosowanie wcięć szerokich.

Biorąc pod uwagę również wyniki w przypadku wysokocyklowego zmęczenia, różnice dla poszczególnych wariantów w średniej wartości trwałości zmęczeniowej w porównaniu z wariantem podstawowym są zauważalne. Jednak wraz ze spadkiem poziomu obciążenia różnice w trwałości zmęczeniowej są mniejsze. Analizując różnicę tego parametru dla obszaru zmęczenia wysokocyklowego, wyznaczono średnie wartości trwałości zmęczeniowej dla naprężenia cyklicznego wynoszącego 7 MPa. W wariacie bazowym średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $27,533 \times 10^3$ , natomiast dla wariantu z wcięciami szerokimi wyniosła  $212,751 \times 10^3$  co stanowi wzrost o ok. 672 %. Z kolei dla wariantu z wcięciami średnimi, średnia wartość trwałości zmęczeniowej wyniosła  $192,361 \times 10^3$  i udowodniono tym wzrost o 598 %. Natomiast dla wariantu z wcięciami średnimi, gdzie trwałość zmęczeniowa to  $61,678 \times 10^3$  oznacza to wzrost o ok. 124% w porównaniu do wariantu bazowego. Analizując kolejną wartość obciążenia zmiennego o maksymalnej wartości 6,5 MPa można wysunąć następujące spostrzeżenia. Dla wariantu podstawowego średnia trwałość zmęczeniowa przy obciążeniu zmiennym 6,5 MPa wyniosła  $183,093 \times 10^3$ , w przypadku gdy dla wariantu z wcięciami szerokimi wyniosła  $1209,089 \times 10^3$  i jest to poprawa o ok. 560% w stosunku do wariantu bazowego. Natomiast dla wariantu z wcięciami średnimi średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $875,499 \times 10^3$  przy tym samym obciążeniu zmiennym, co stanowi wzrost o ok. 378%

w porównaniu do wariantu podstawowego. Analizując podobnie wariant z wcięciami wąskimi w porównaniu do wariantu bazowego, wyniki wskazują poprawę o ok. 37% średniej trwałości zmęczeniowej, która w wariantcie z wcięciami wyniosła  $251,258 \times 10^3$ . Dopełniając powyższe rozważania, na podstawie przedstawionych w powyższych tabelach wyników dla obciążenia zmiennego o maksymalnej wartości równej 6 MPa, średnia trwałość zmęczeniowa dla wariantu bazowego wyniosła  $898,031 \times 10^3$ , gdy dla wariantu z wcięciami szerokimi osiągnęła zakładany limit granicznej liczby cykli równej  $2 \times 10^6$ , co przedkłada się na wzrost o ok. 122%. Dla wariantu z wcięciami wąskimi przy tym samym poziomie obciążenia zmiennego, wartość średniej trwałości zmęczeniowej wyniosła  $1220,816 \times 10^3$  i jest to wzrost o ok. 35% w stosunku do wariantu podstawowego. Na tej podstawie można śmiało potwierdzić wcześniejsze stwierdzenie, że wraz ze spadkiem poziomu obciążenia różnice w trwałości zmęczeniowej są mniejsze.

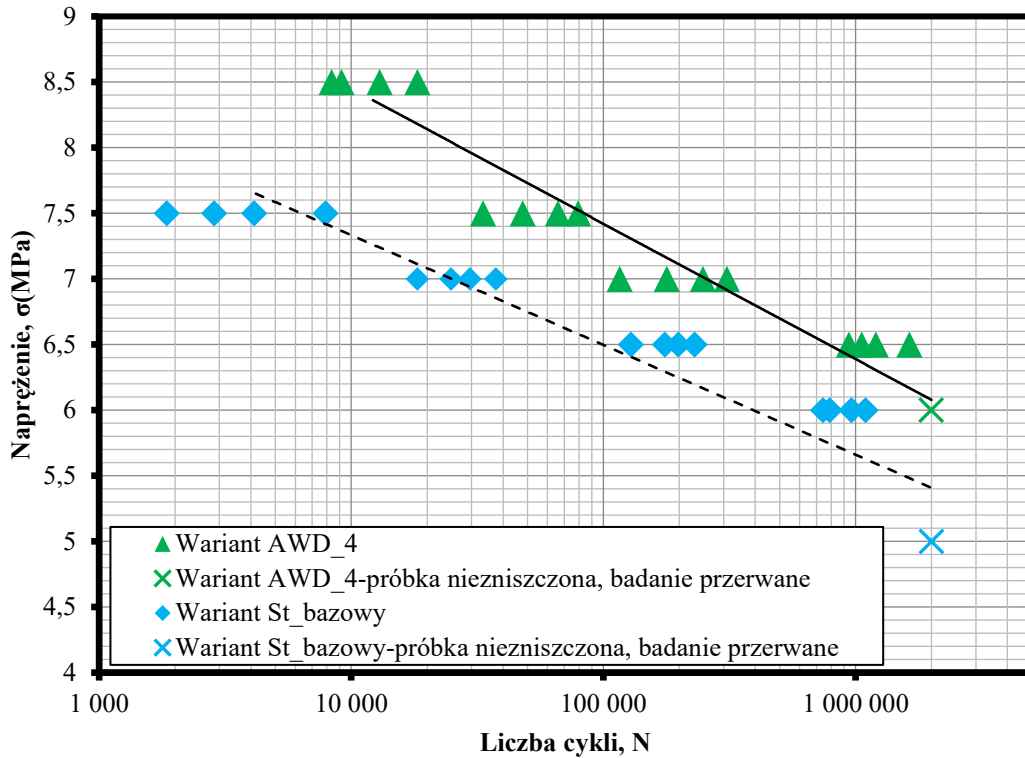
W tabeli 5.10 poniżej przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych i analizy statycznej dla wariantu z wykonanymi otworami w próbkach połączenia klejowego. W tym przypadku zauważalne jest, iż wartość amplitudy naprężenia nie osiągnęła tak wysokich wartości jak w przypadku wariantów z wcięciami szerokimi i średnimi i jest zbliżona do wartości dla wariantu z wcięciami wąskimi i wariantu bazowego.

Dla obciążenia zmiennego o maksymalnej wartości 7,5 MPa złącza w wariantcie podstawowym osiągnęły średnią trwałość zmęczeniową równą  $4,183 \times 10^3$ . Natomiast dla wariantu z otworami średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $9,019 \times 10^3$ , co daje niewątpliwy wzrost o ok. 115% w porównaniu z wariantem bazowym. Wzrost na tym samym poziomie można zauważyć także dla pozostałych wartości obciążenia zmiennego wariantu z otworami w porównaniu z wariantem bazowym. Na tej podstawie można stwierdzić, że istnieje wpływ na zjawisko zmęczeniowe połączenia klejowego w zakresie niskocyklowego zmęczenia również w przypadku wykonania otworów w czołowej strefie zakładki. Poddając analizie wyniki, jak w przypadku wariantów z wcięciami, dla obszaru zmęczenia wysokocyklowego, wyznaczono średnią trwałość zmęczeniową dla naprężenia cyklicznego wynoszącego 7 MPa o wartości  $64,147 \times 10^3$ , co przedkłada się na wzrost o ok. 133% w porównaniu z próbką bazową. z kolei dla mniejszego poziomu obciążenia zmiennego o maksymalnej wartości 6,5 MPa trwałość zmęczeniowa wyniosła  $360,695 \times 10^3$ , co z tym przypadkiem daje wzrost o 96% w stosunku do wariantu podstawowego. Świadczy to, że i w tym przypadku wraz ze spadkiem poziomu obciążenia różnice w trwałości zmęczeniowej są mniejsze.

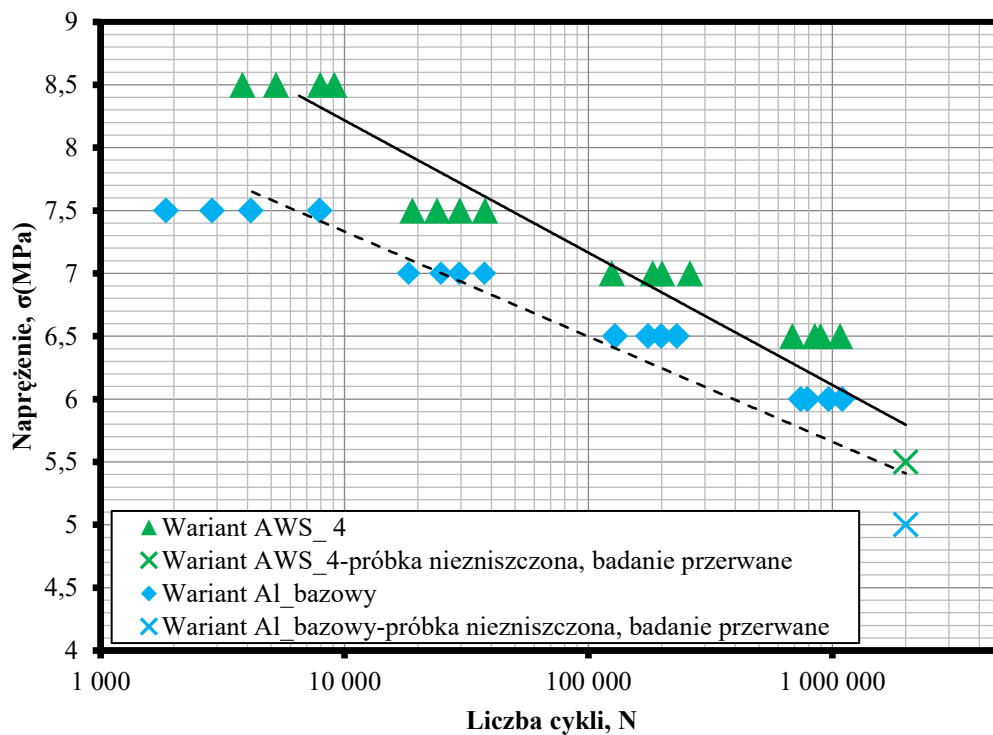
Tab. 5. 10. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z otworami w wariancie AO

Wartość amplitudy naprężenia [MPa]	Wartość dla poszczególnych próbek				
	7,5	7	6,5	6	5
Liczba cykli niszczących $N \times 10^3$	7,429	60,701	60,701	1286,346	2000,000
	10,631	79,539	79,539	1442,562	2000,000
	5,274	53,121	53,120	985,971	2000,000
	12,743	63,227	63,227	1190,745	2000,000
Logarytm liczby cykli $\lg N$	3,871	4,783	5,627	6,109	6,301
	4,026	4,901	5,474	6,159	6,301
	3,722	4,725	5,307	5,993	6,301
	4,105	4,802	5,713	6,075	6,301
Wartość średnia $\bar{N}$	9,019	64,147	360,695	1226,406	2000,000
Wartość średnia $\overline{(\lg N)}$	3,931	4,802	5,531	6,084	6,301
Odchylenie standardowe $s$	0,147	0,063	0,154	0,061	-
Współczynnik zmienności $W_s = \frac{s}{\overline{\lg N}} \cdot 100\%$	3,745%	1,315%	2,795%	0,988%	-
Wartość $t_\alpha$ dla poziomu ufności $p = 95\% (\alpha = 0.05)$	3,182	3,182	3,182	3,182	-
$t_\alpha \cdot s$	0,468	0,201	0,491	0,191	-
$\log N_{max}$	4,399	5,003	6,022	6,275	-
$N_{max} \times 10^3$ cykli	25,106	100,806	1054,124	1887,919	-
$\log N_{min}$	3,462	4,601	5,038	5,893	-
$N_{min} \times 10^3$ cykli	2,901	39,946	109,380	781,814	-
Wytrzymałość zmęczeniowa $Z_G$ [MPa]	5				
Równanie regresji liniowej krzywej zmęczeniowej	$\sigma = -1,083e^{-6} x + 7,193$				

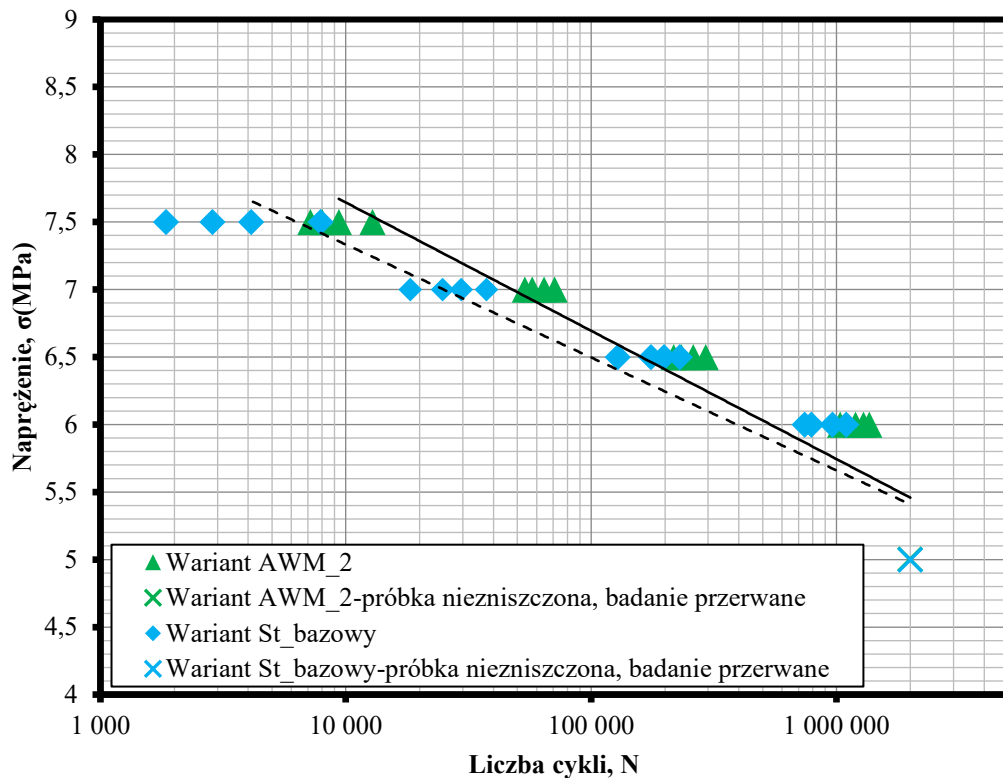
Badając wpływ zastosowanych modyfikacji wykonanych na krawędzi połączenia klejowego na właściwości zmęczeniowe połączeń klejowych można wysunąć szereg wniosków porównując krzywe zmęczeniowe wariantu bazowego oraz pozostałych wariantów, z wcięciami i z otworami. Jak już wspomniano wprowadzenie wcięć w elementach klejonych ma znaczny wpływ na zjawiska zmęczeniowe w połączeniach klejowych w zakresie niskocyklowego zmęczenia. Na rysunkach 5.10 – 5.13 przedstawiono krzywe zmęczeniowe dla poszczególnych wariantów porównując ją z krzywą zmęczenia dla wariantu bazowego.



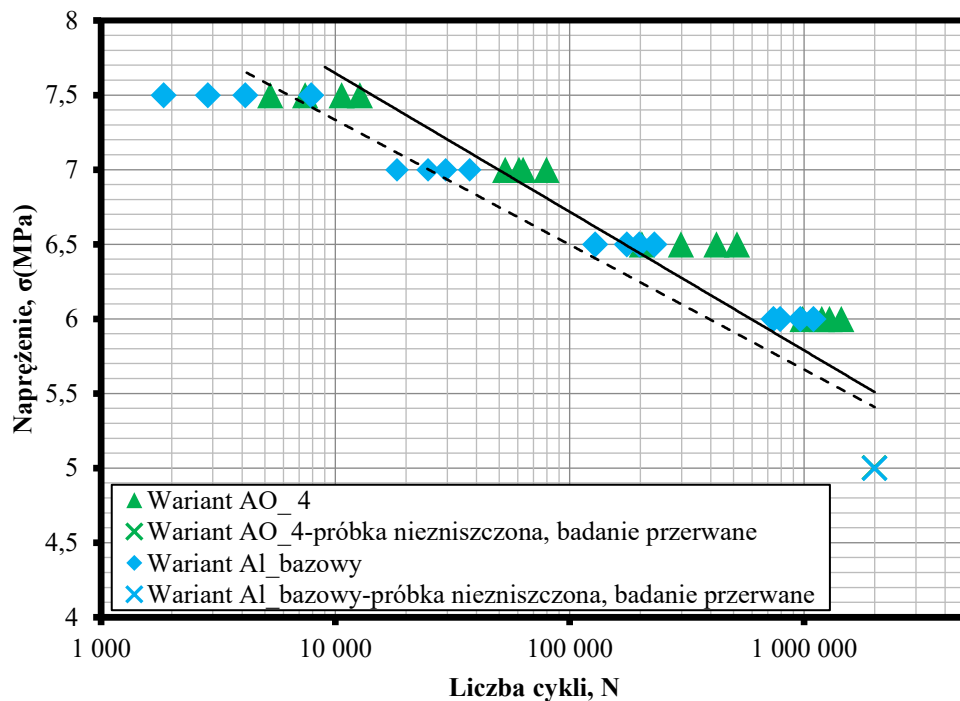
Rys. 5. 10. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z wcięciami szerokimi AWD o długości 4 mm [opracowanie własne]



Rys. 5. 11. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z wcięciami średnimi AWS o długości 4 mm [opracowanie własne]



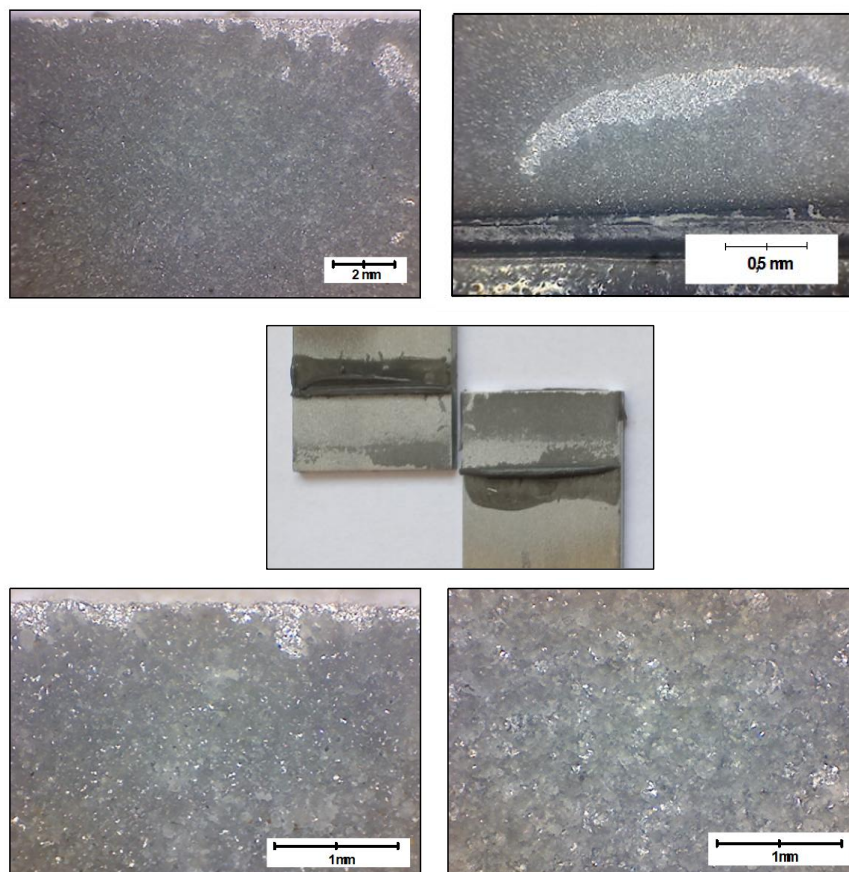
Rys. 5. 12. Porównanie krzywych zmęczenia dla złączy wariantu bazowego z wariantem z wcięciami wąskimi AWM o długości 2 mm [opracowanie własne]



Analiza statyczna wykazała, że na każdym badanym poziomie obciążenia cyklicznego dla wariantów z zastosowanymi modyfikacjami konstrukcyjnymi zaobserwowano istotny wpływ trwałości zmęczeniowej w porównaniu do wariantu podstawowego. Na rysunku 5.10 przedstawiono porównanie krzywych zmęczenia wariantu z wcięciami szerokimi o długości 4 mm do wariantu bazowego. W tym przypadku bardzo wyraźnie widać, iż wyznaczona krzywa dla wariantu z modyfikacjami jest znacznie oddalona od krzywej dla wariantu bazowego. Podobnie jest w przypadku krzywej zmęczenia dla wariantu z wcięciami średnimi. Oznacza to, że zastosowane modyfikacje znacznie przyczyniły się do zmiany wytrzymałości zmęczeniowej połączenia klejowego. Natomiast dla wariantu z wcięciami wąskimi i wariantu z otworami, rys. 5.12 i rys. 5.13, krzywe zmęczenia nie są tak bardzo oddalone, co wskazuje na mniejszy wpływ dla tego typu zmian konstrukcyjnych w zakładce połączenia klejowego. We wszystkich przypadkach daje się także zauważyć odmienne nachylenie krzywych zmęczenia w stosunku do wariantu bazowego. Jest to spowodowane faktem, że im niższa wartość zmiennego obciążenia maksymalnego, tym mniejszy wpływ modyfikacji na trwałość zmęczeniową. z uwagi na tę tendencję przyjęto graniczną liczbę cykli równą  $2 \times 10^6$ . z drugiej strony, najmniejsza średnia liczba cykli wykazana w badaniach dla wariantu bazowego wyniosła  $4,183 \times 10^3$  podczas gdy, najmniejsza średnia liczba cykli dla wariantów z wcięciami szerokimi przy większym zmiennym obciążeniu maksymalnym osiąga wartość  $12,182 \times 10^3$ , a dla wariantu z wcięciami średnimi  $6,517 \times 10^3$ . Dla wariantów z wcięciami wąskimi oraz wariantu z otworami nie wykazano badań przy większej wartości obciążenia zmęczeniowego w porównaniu z wariantem bazowym. Jak wynika z przedstawionych powyżej krzywych, badania zakończono na obszarze od ok. 1 500 cykli zmęczeniowych. Nie badano obszaru zmęczeniowa w zakresie od zero do kilku set cykli, zatem nie wiadomo jak zachowuje się krzywa w tym obszarze. Można wnioskować że, na podstawie wyników badań statycznych, które nie wykazały istotnego wpływu zastosowanych zmian konstrukcyjnych w obszarze złącza na wytrzymałość, że wraz ze wzrostem obciążenia zmęczeniowego wpływ badanych modyfikacji będzie mniej znaczący. z niniejszych wniosków na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w przypadku zmęczenia niskocyklowego dla przedstawionych wartości obciążeń maksymalnych wpływ nacięć i otworów jest największy.

## 5.4 Wyniki analizy makroskopowej próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3

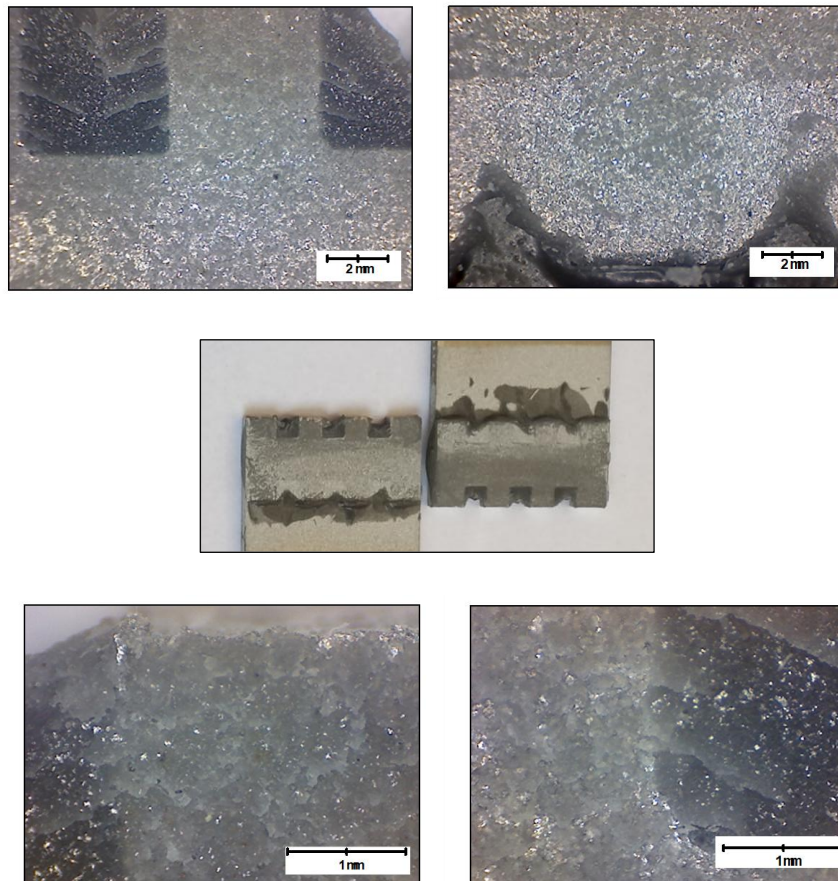
Wpływ zastosowanych wcięć w geometrię czołowej części zakładki elementów klejonych na poprawę trwałości zmęczeniowej potwierdzono dokonując analiz fotograficznych dla wybranych wariantów rozważanych połączeń klejowych próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3.



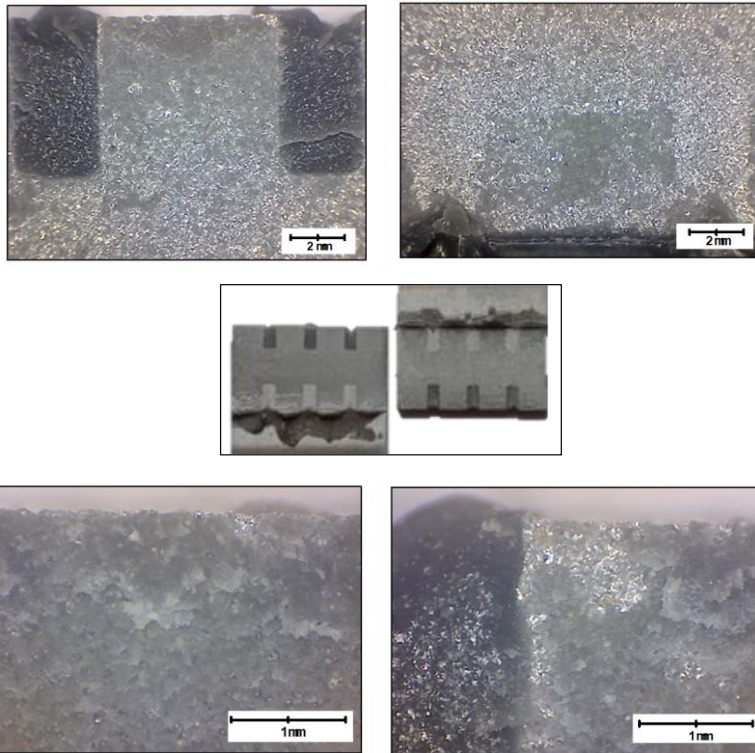
Rys. 5. 14. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariantcie bazowym dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 [opracowanie własne]

Na rysunkach 5.14 – 5.17 przedstawiono makroskopowe widoki fragmentów powierzchni pęknięć zmęczeniowych dla wybranych próbek rozważanych wariantów. Dla wariantu bazowego, rys. 5.14, wybrano próbkę o liczbie cykli niszczących  $4,124 \times 10^3$ , która to wartość jest zbliżona do średniej wartości trwałości zmęczeniowej dla tego wariantu. Na zdjęciach makroskopowych, na przedstawionym obszarze można zaobserwować równomierny charakter spękań. Na rysunku 5.15 przedstawiono makroskopowy widok fragmentu

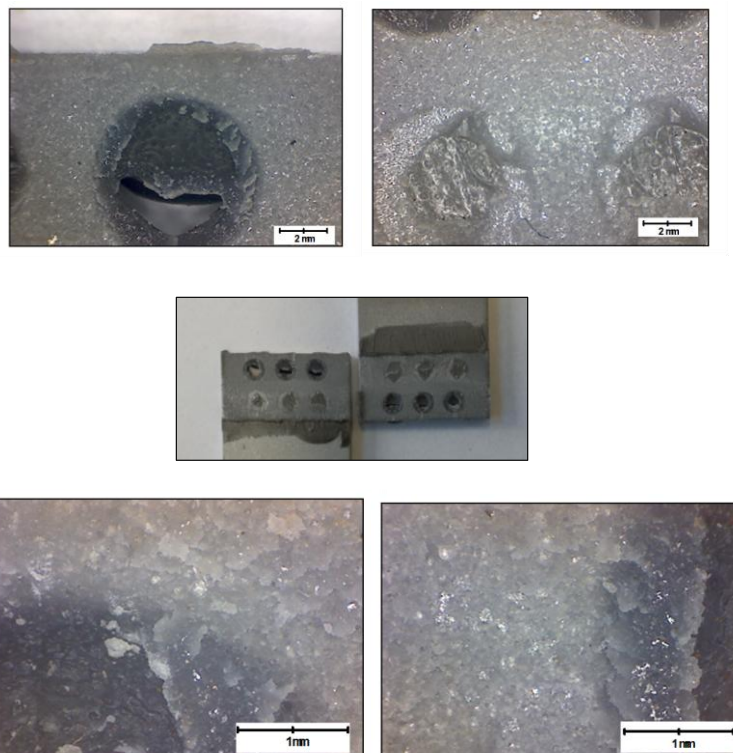
powierzchni pęknięć zmęczeniowych dla wariantu z wcięciami szerokimi o długości 4 mm. Na zdjęciach zaobserwowano inny charakter pęknięć niż w przypadku wariantu bazowego, w szczególności w obszarach wykonanych wcięć. Wypełnione klejem wcięcia są obszarami o większej elastyczności. Dodatkowa objętość kleju wypełniająca wcięcia rozprasza obciążenie przykładane w każdym cyklu zmęczeniowym. Uwidocznione jest to w obszarze złącza przy krawędzi natarcia kleju, w którym występują najbardziej znaczące zjawiska zmęczeniowe.



Rys. 5. 15. Powierzchnie pęknięć jednozakładowego połączenia klejowego w wariantcie z wcięciami szerokimi o szerokości 3 mm i długości 3 mm próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 [opracowanie własne]



Rys. 5. 16. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariantcie z wcięciami średnimi o szerokości 2 mm i długości 4 mm ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 [opracowanie własne]



Rys. 5. 17. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariantcie z otworami o średnicy 4 mm ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 [opracowanie własne]

Potwierdza to także, przedstawiona na rysunku 5.16 powierzchnia pęknięć zmęczeniowych dla wariantu z wcięciami średnimi o długości 4 mm oraz powierzchnia pęknięć zmęczeniowych dla wariantu z otworami o średnicy 4 mm, rys. 5.17. Przez wzgląd na charakterystyczną koncentrację naprężeń na krawędziach natarcia złącza, to właśnie na krawędziach inicjowane jest pęknięcie zmęczeniowe. Na przedstawionych zdjęciach makroskopowych widać jak rozprzestrzenia się do środkowej części złącza. Potwierdza to stawianą hipotezę, że wcięcia i otwory wypełnione klejem powodują akumulację części energii związanej z odkształcaniem się złącza w każdym cyklu. Głębsze uskoki zmęczeniowe na przelomach zmęczeniowych w obszarze wcięć i otworów świadczą o mniejszej propagacji pęknięć zmęczeniowych dla tego obszaru. Spowodowane jest to pochłanianiem tej dodatkowej energii poprzez masę utwardzonego kleju wypełniającego wcięcia oraz otwory podczas procesu propagacji pęknięć zmęczeniowych. Na poprawę trwałości zmęczeniowej wpływa również zjawisko związane ze zmianą rozkładu naprężeń w warstwie kleju. Dzięki lokalnemu przesunięciu spiętrzenia naprężeń w obszar naroży wcięć oraz obwodu otworów, inicjacja pęknięcia zmęczeniowego jest utrudniona w porównaniu do wariantu bazowego.

## Podsumowanie i wnioski

Analizę wpływu modyfikacji konstrukcyjnych czołowej krawędzi elementów klejonych na wytrzymałość statyczną i zmęczeniową jednozakładowych połączeń klejowych wykonanych ze stali S235JR oraz ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 przeprowadzono w kilku etapach.

Pierwszy etap zakładał wykonanie modelu numerycznego MES jednozakładowych połączeń klejowych. Model został opracowany w programie NX Simcenter. W ramach analizy numerycznej metodą elementów skończonych modele wybranych wariantów zmienionej geometrii strefy przykrawędziowej złącza zostały poddane analizie, w której określono rozkłady naprężeń w spoinie klejowej, oraz porównano z wariantem bazowym.

Drugim etapem pracy badawczej było przygotowanie próbek jednozakładowych połączeń klejowych celem realizacji badań eksperymentalnych zarówno statycznych jak i zmęczeniowych. Badania przeprowadzono dla połączeń jednoimiennych wykonanych z dwóch różnych metali konstrukcyjnych, tj. stali S235JR oraz stopu aluminium EN AW-2024-T3. W wykonano próbki połączeń bazowej tj. bez zmiany geometrii w strefie przykrawędziowej jako wariant odniesienia. Celem analizy wpływu zmian konstrukcyjnych przygotowano także próbki z modyfikacjami w czołowej części połączenia. Przed wykonaniem połączeń przeprowadzono analizę powierzchni klejonych elementów określającą jej topografię, a także właściwości energetyczne na podstawie pomiarów swobodnej energii powierzchniowej. Jednozakładowe połączenia klejowe zostały wykonane przy użyciu kleju epoksydowego do metali Araldite 2014-2. Tak wykonane próbki zostały poddane badaniom wytrzymałości statycznej celem określenia wpływu zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych na ich właściwości mechaniczne.

W trzecim etapie badań próbki zostały poddane badaniom wytrzymałości zmęczeniowej oraz przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej analizie fraktograficznej w celu weryfikacji mechanizmów pękania zmęczeniowego. Kolejno zrealizowano badania porównawcze wytrzymałości zmęczeniowej zakładowych połączeń klejowych dla wariantów z modyfikacjami porównując je z wariantem bazowym. Badania miały na celu weryfikację, czy zastosowanie prostych modyfikacji konstrukcyjnych przy czołowych krawędziach elementów łączonych, tj. zastosowanie wcięć lub otworów o różnych wymiarach przyczynią się do poprawy trwałości zmęczeniowej połączeń.

Koncepcja modyfikowania czołowych krawędzi elementów klejonych wywodzi się z faktu, iż przy tych krawędziach dochodzi do znaczącego spiętrzenia naprężeń zarówno stycznych jak i normalnych. Spiętrzenia te mają miejsce na krótkim odcinku złącza, w związku z tym postanowiono podjąć próbę zniwelowania tych spiętrzeń poprzez modyfikacje konstrukcyjne.

Analiza uzyskanych wyników badań pozwoliła na udowodnienie poprawności hipotezy postawionej w niniejszej pracy, zgodnie z którą wykonanie wcięć oraz perforacji w strefie przykrawędziowej jednozakładkowego połączenia klejowego mają wpływ na nośność połączenia.

Dla przyjętych w badaniach różnych typach modyfikacji geometrii zakładki sformułowano wnioski poznawcze i użytkowe.

1. Analiza numeryczna MES wykazała, że rozważane modyfikacje konstrukcyjne nie prowadzą do znaczącej redukcji wartości naprężenia w obciążonej warstwie kleju. Jednak wywołują zmiany charakteru rozkładu naprężenia w spoinie co z kolei prowadzi do częściowego przeniesienia spiętrzeń do wewnętrznych krawędzi wcięć i otworów.
2. W ramach badań wytrzymałości statycznej wykazano, że wpływ zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych nie jest znaczący na właściwości połączeń określone w próbach statycznych. Jedynie dla wybranych wariantów wykazano istotny przyrost wytrzymałości statycznej na ścinanie. Dla połączeń elementów stalowych, w przypadku wariantu z wcięciami o szerokości 3 mm i długości 1 mm doszło do wzrostu wytrzymałości o 13,48% w stosunku do wariantu bazowego. Z kolei największy przyrost wytrzymałości w przypadku połączeń elementów ze stopu aluminium odnotowano dla wariantu z wcięciami o szerokości i długości 2 mm. W odniesieniu do wariantu bazowego przyrost wyniósł 8,77%.
3. Warianty z modyfikacjami w postaci otworów wzdłuż krawędzi czołowej wywołały nieznaczny spadek wytrzymałości statycznej na ścinanie.
4. Przeprowadzona szczegółowa analiza statystyczna uzyskanych rezultatów badań wytrzymałości wykazała, że przy uwzględnieniu rozrzutów wyników, poddane analizie modyfikacje konstrukcyjne nie mają znaczącego wpływu na wytrzymałość statyczną na ścinanie konstrukcyjnych połączeń klejowych.
5. W ramach badań wytrzymałości zmęczeniowej wykazano bardzo istotny wpływ rozpatrywanych modyfikacji konstrukcyjnych na trwałość zmęczeniową dla każdego

z wariantów. W obszarze wysokocyklowego zmęczenia dla próbek połączeń elementów stalowych przy maksymalnej wartości obciążenia zmiennego równej 9 MPa wykazano przyrost średniej trwałości zmęczeniowej 275% dla wariantu z wcięciami o szerokości 1 mm. W tym przypadku średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $1539,576 \times 10^3$  cykli podczas gdy dla wariantu bazowego  $410,516 \times 10^3$  cykli. Również dla wariantu z otworami przy krawędzi wykazano wzrost średniej trwałości zmęczeniowej do wartości  $1162,916 \times 10^3$  co stanowi przyrost o 83,3% w odniesieniu do wariantu bazowego.

6. Przechodząc do próbek połączeń elementów ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, przy wysokocyklowym zmęczeniu dla wariantu z wcięciami o szerokości 3 mm, przy maksymalnym poziomie obciążenia zmiennego o wartości równej 6,5 MPa wykazano przyrost średniej trwałości zmęczeniowej o 560,4% w stosunku do wariantu bazowego. Dla połączeń modyfikowanych średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $1209,089 \times 10^3$  cykli, z kolei dla wariantu bazowego  $183,093 \times 10^3$  cykli. Dla wariantu z otworami średnia wartość trwałości zmęczeniowej wyniosła  $360,695 \times 10^3$  co przekłada się na wzrost o 97%.
7. Przyczyn znaczącego przyrostu trwałości zmęczeniowej dzięki zastosowanym modyfikacjom konstrukcyjnym należy upatrywać w dwóch zjawiskach. Poddane analizie w pracy zmiany konstrukcyjne czołowej krawędzi elementów klejonych jak wykazano w ramach analizy MES, przekładają się na zmianę charakteru rozkładu naprężeń w złączu. Typowe spiętrzenia naprężeń bezpośrednio przy krawędziach obciążonego połączenia ulegają częściowemu przesunięciu w kierunku oddalonych od krawędzi blachy naroży wcięć oraz obwodu otworów. Zjawisko to powoduje swego rodzaju rozproszenie spiętrzenia naprężeń na większej powierzchni. W związku z tym inicjacja oraz propagacja pęknięć zmęczeniowych wymaga wówczas większej energii. Skutkuje to tym, iż obszary wcięć i otworów wywołują przełamywanie głównych prążków zmęczeniowych propagujących od czołowej krawędzi złącza. Zjawisko to uwidoczniło na wybranych przełamach zmęczeniowych. Drugą z zasadniczych przyczyn znaczącej poprawy trwałości zmęczeniowej należy upatrywać, w tym że klej wypełniający wcięcia i otwory w każdym cyklu obciążenia zmiennego absorbuje część energii i rozprasza ją, co w efekcie zmniejsza ilość energii prowadzącej do niszczenia zmęczeniowego spoiny.

Podsumowując należy zauważyć, że konstrukcyjne połączenia klejowe są coraz powszechniej stosowane w wielu branżach w tym w przemyśle motoryzacyjnym oraz lotniczym. Dzięki możliwości łączenia adhezyjnie różnych materiałów, rozpatrywane połączenia są coraz chętniej stosowane w budowie konstrukcji, które wymagają obniżenia masy bez utraty nośności i sztywności. Jest to niezwykle istotne w obliczu konieczności zabiegania o redukcję CO<sub>2</sub> w odniesieniu do konstrukcji środków transportu. W związku z tym trzeba podkreślić, że w odniesieniu do połączeń klejowych niezwykle ważne jest zapewnienie wysokiej trwałości zmęczeniowej. Przedstawione w pracy wyniki badań dowodzą, że poprzez relatywnie nieznaczne, nie wymagające dużych nakładów finansowych zmiany konstrukcyjne możliwa jest znacząca poprawa trwałości zmęczeniowej. Klejone elementy konstrukcyjne w warunkach produkcyjnych mogą być wykrawane z nadaniem określonej geometrii strefy przykrawędziowej. Jak wykazano modyfikacje te mogą przynieść wymierne korzyści poprawiając trwałość zmęczeniową, a tym samym mogą umożliwić redukcję wymiarów konstrukcji, a także zużycie materiałów.

## Bibliografia

- [1] Rudawska A. (2016). Oprzyrządowanie w technologii klejenia. Lublin: Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej.
- [2] da Silva L.F.M., Adams R.D. (2007). Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27, 227–235.
- [3] Apalak M.K., Engin A. (2004). Effect of adhesive free-end geometry on the initiation and propagation of damaged zones in adhesively bonded lap joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18, 529–559.
- [4] da Silva L.F.M., Adams R.D. (2007). Adhesive joint at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27, 216–226.
- [5] Czaplicki J., Ćwikliński J., Godzimirski J., Konar P. (1987). Klejenie tworzyw konstrukcyjnych. Warszawa: WKiŁ.
- [6] Kuczmaszewski J. (2006). Fundamentals of metal-metal adhesive joint design. Lublin: Polish Academy of Science.
- [7] Rudawska A., Cisek J., Semotiuk L. (2012). Wybrane aspekty wytrzymałości połączeń klejowych oraz lutowanych stosowanych w konstrukcjach lotniczych. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 2, 61-66.
- [8] Rudawska A., Czarnota M. (2011). Wpływ operacji odtłuszczenia na właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej oraz wytrzymałość połączeń klejowych blach miedzianych. *Postępy Nauki i Techniki*, 8, 137-147.
- [9] Rutkowski A. (2009). Części maszyn. Warszawa: WSiP.
- [10] Rudawska A., Kuczmaszewski J. (2005). Klejenie blach ocynkowanych. Lublin: Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [11] Brockmann W., Geiß P.L., Klingen J., Schröder B. (2009). Adhesive bonding. *Materials, Applications and Technology*. Germany: Wiley-Vch Press.
- [12] Holtzer M. (2013). Procesy metalurgiczne i odlewnicze stopów żelaza. Podstawy fizykochemiczne. Warszawa: PWN.
- [13] Rabek J.F. (2013). Polimery. Otrzymywanie, metody badawcze, zastosowanie. Warszawa: PWN.

- [14] Barbosa N.G.C., Campilho R.D., Silva F.J., Moreira R.D. (2018). Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures. *Applied Adhesion Science*, 15.
- [15] Silva T.C., Nunes L.C.S. (2014). A new experimental approach for the estimation of bending moments in adhesively bonded single lap joints. *Int J AdhesAdhes*, 54, 13–20.
- [16] Kadioglu F., Adams R.D. (2015). Flexible adhesives for automotive application under impact loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 56, 73–78.
- [17] Davies P., Sohier L., Cognard J-Y (2009). Influence of adhesive bond line thickness on joint strength. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 724–736.
- [18] Karachalios E.F., Adams R.D., da Silva L.F.M. (2013). The behaviour of single lap joints under bending loading. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27, 1811–1827.
- [19] da Silva L.F.M, Neves P.J.C., Adams R.D. (2009). Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: literature survey. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 319–330.
- [20] Bartczak B., Mucha J., Trzepieciński T. (2013). Stress distribution in adhesively-bonded joints and the loading capacity of hybrid joints of car body steels for the automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 45, 42–52.
- [21] Kubieniec G. (2008). Nośność blachownic stalowych wzmacnianych z zastosowaniem klejenia, praca doktorska, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, s.13-20
- [22] Domińczuk J. (2011). Właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych. *Postępy Nauki i Techniki*, 9: 28–37. 6.
- [23] Godzimirski J., Tkaczuk S. (2004). Określenie właściwości mechanicznych spoin klejowych. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 3-4.
- [24] Godzimirski J. (2002). Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. Warszawa: WNT.
- [25] Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W. (1997). Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [26] Szlezyngier W. (1994). Właściwości modyfikowanych klejowych żywic epoksydowych. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 3, 35-36.
- [27] Kuczmaszewski J. (1995). Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali. Lublin: Politechnika Lubelska.
- [28] Rudawska A. (2013). Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych. Politechnika Lubelska, s. 23-80.

- [29] Shiuh-Chuan H. (1999). Stress analysis of adhesively-bonded lap joints. *Composite Structures*, 47, 673-678.
- [30] Adams R. D., Wake W. C. (1984). *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, s. 19-23.
- [31] PN-69/C-89300 Kleje do metali, oznaczenie wytrzymałości na ścinanie.
- [32] PN-EN 1465:2009 Kleje. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę.
- [33] Rudawska A. (2003). Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych, *Politechnika Lubelska*, s. 115-130.
- [34] Piekarczyk M. (2002). Zastosowanie połączeń klejonych w konstrukcjach metalowych, *Technical Transactions*, zeszyt 1-B, s. 99-137.
- [35] Godzimirski J. (2009). Problemy klejenia konstrukcyjnego. *Technologia i automatyzacja montażu*, 1, 29-31.
- [36] Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W. (1997). *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [37] Domińczuk J. (2011). Wpływ wybranych czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych. *Postępy Nauki i Techniki*, 10, 14-26.
- [38]. Kuczmaszewski J. (1995). *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [39] Kuczmaszewski J.: Prognozowanie wytrzymałości statycznej wybranych połączeń adhezyjnych. *Polimery*, 1988, 7-8, 299-302.
- [40] Kuczmaszewski J. (1998). O pewnych problemach podobieństwa w zakładkowych i doczołowych połączeniach adhezyjnych. *Tworzywa sztuczne w budowie maszyn*. Kraków, 105-110.
- [41] da Silva L.F.M., Adams R.D. (2007). Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27, 362–379.
- [42] da Silva L.F.M., Ochsner A., Adams R.D. (2011). *Handbook of adhesion technology*. Heidelberg: Springer.
- [43] Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W. (1997). *Konstrukcyjne*

połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.

[44] Czaplicki J., Ćwikliński J., Godzimirski J., Konar P. (1987). Klejenie tworzyw konstrukcyjnych. WKŁ, Warszawa.

[45] Ward J.M. (1975). Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych. PWN, Warszawa.

[46] Godzimirski J. (1988). Analiza wytrzymałości połączeń klejowych elementów metalowych obciążonych statycznie. Rozprawa habilitacyjna. WAT, Warszawa.

[47] Farag M.M. (Ed.). (n.d.). Materials and process selection for engineering design. Taylor & Francis Group.

[48] User's Guide to Adhesives. Ciba-Geigy. Retrieved from <http://www.on-hand.com/Manuals/GuidetoAdhesives.pdf>

[49] Melograna J.D., Grenstedt L.J., Maroun W.J. (2003). Adhesive tongue-and-groove joints between thin carbon fiber laminates and steel. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34, 119–124.

[50] Ashcroft I.A., Abdel Wahab M.M., Crocombe A.D., Hughes D.J., Shaw S.J. (2001). The effect of environment on the fatigue of bonded composite joints. Part 1: Testing and fractography. *Composites: Part A*, 32, 45–58.

[51] Rudawska A. (2017). Przygotowanie powierzchni do klejenia wybranych materiałów konstrukcyjnych. Lublin: Politechnika Lubelska.

[52] Rudawska A. (2010). Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozję. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 3, 36–39.

[53] Xiao G.Z. (1997). Effects of solvent on the surface properties of oxygen plasma-treatment polyethylene and polypropylene films. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 11, 655–663.

[54] Żenkiewicz M. (2000). Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. Warszawa: WNT.

[55] Sheu G.S., Shyu S.S. (1994). Surface modification of Kevlar 149 fibers by gas plasma treatment. Part II. Improved interfacial adhesion to epoxy resin. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 8, 1027–1042.

- [56] Komorek A., Przybyłek P. (2015). Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych na ścinanie. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 3, 43-47.
- [57] Johnsen B.B., Lapique F., Bjørgum A. (2004). The durability of bonded aluminium joints: a comparison of AC and DC anodizing pretreatments. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24, 153–161.
- [58] Kuczmaszewski J. (1990). *Technologia śmigłowców, Teoria i technika klejenia*. Lublin: Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [59] Kumosa L., Armentrout D., Kumosa D. (2002). The effect of sandblasting on the initiation of stress corrosion cracking in unidirectional E-glass/polymer composites used in high voltage composite (non-ceramic) insulators. *Composite Science Technology*, 62, 1999–2015.
- [60] Lunder O., Lapique F., Johnsen B. (2004). Effect of pretreatment on the durability of epoxy-bonded AA6060 aluminum joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24, 107–117.
- [61] Polini W., Sorrentino L. (2007). Adhesion of a protective coating on a surface of aluminum alloy treated by air cold plasma. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27, 1–8.
- [62] Prolongo S.G., Ureña A. (2009). Effect of surface pre-treatment on the adhesive strength of epoxy-aluminum joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 24–47.
- [63] Sabiniak H.G., Bińczyk M. (n.d.). Klejenie miedzi w instalacjach centralnego ogrzewania. Retrieved from <http://www.eko-dok.pl/2013/67.pdf>.
- [64] Godzimirski J. (1992). Wpływ ukosowania krawędzi klejonych elementów na wytrzymałość połączeń zakładkowych. BIUL.WAT, Warszawa.
- [65] Rudawska A., Błaziak M. (2011). Analiza porównawcza siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo nitowe oraz nitowe stopu tytanu. *Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 83, 147-156.
- [66] Sztumski J. (2005). *Wstęp do metod i technik badań*. Katowice: Wydawnictwo Naukowe Śląsk.
- [67] Smal T. (2000). *Badanie klejowych mas regeneracyjnych dla potrzeb napraw polowych Sprzętu wojskowego. Rozprawa doktorska*. WAT, Warszawa.
- [68] Raczkowski D., Godzimirski J., Kowalczyk S. (1995). *Badania własności materiałów: Belzona 1111, Belzona 1221 oraz ocena ich przydatności dla potrzeb wojska. Sprawozdanie z pracy badawczej*. WAT, Warszawa.

- [68] Chapman R.G. (1989). Problem-definition in marketing research studies. *Journal of Services Marketing*, 3, 51-59.
- [69] Thermofisher Scientific. (n.d.). Phenom ProX. Retrieved from <https://pik-instruments.pl/nauka/mikroskopia-elektronowa/thermofisher-scientific/phenom-prox/>
- [70] Adams R.D., Wake W.C. (1984). *Structural Adhesive Joints in Engineering*. Elsevier, Amsterdam.
- [71] Godzimirski J. (1996). Konstrukcyjne możliwości zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych. *Technologia i Automatykacja Montażu*. 4, 23-35.
- [72] Harsan K. (1997). Wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość zmęczeniową klejonych połączeń czopowo-tulejowych. Rozprawa doktorska. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów.
- [73] Ptakowska-Wyżanowicz H.(1961) Klejenie metali. PWT, Warszawa.
- [74] Świtkiewicz R. (1972). Trwałość zmęczeniowa elementów konstrukcji o strukturze warstwowej klejonej. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Warszawa.
- [75] Matwijkenko W., A. (1994). Wpływ czynników konstrukcyjno-technologicznych na wytrzymałość zmęczeniową połączeń klejowo-nitowych. *Technologia i Automatykacja Montażu*. 2, 33-35.
- [76] Zielecki W., Łunarski J. (1995). Wytrzymałość zmęczeniowa na oddzieranie połączeń klejonych Epidianem 5. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 7.
- [77] Zielecki W. (1994). Ocena zależności między statyczną a zmęczeniową wytrzymałością na oddzieranie połączeń klejonych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 130 *Mechanika* z.43.
- [78] Godzimirski J., Komorek Z., Komorek A. (2005). Badania trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych. *Biul. WAT LIV* 5-6, 111-120.
- [79] Godzimirski J., Komorek A. (2008). Trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych. *Przegląd Spawalnictwa*, 8, 38-43.
- [80] Harsan K. (1997). Wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość zmęczeniową klejonych połączeń czopowo-tulejowych. Rozprawa doktorska. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów.
- [81] Kuczmaszewski J. (1993). Wpływ sposobu przygotowania warstwy wierzchniej na wytrzymałość adhezyjnych połączeń metali. *Materiały II Międzynarodowej KNT na temat*

wpływu technologii na stan warstwy wierzchniej, 93 Instytut Badań Ekspertyz Naukowych IBEN, Gorzów Wielkopolski.

[82] Adams R. D. (1980). Strength of CFRP lap joint. Materiały konferencji “Adhesion 4” Applied Science Publishers Ltd. London.

[83] Klein B. (1994). Leichtbau - Konstruktion Berechnungsgrundlagen und Gestaltung Vieweg. Verlag GmbH. Braunschweig-Wiesbaden.

[84] PN-EN ISO 9664:2000 Kleje – Metody badań właściwości zmęczeniowych klejów do połączeń konstrukcyjnych przy rozciąganiu ścinającym.

[85] Wojtczak E. (2013). Doświadczalny i matematyczny model zakładkowego połączenia klejowego, 53-58

[86] Da Silva L. F. M., Das Neves P. J. C., Adams R. D. and Spelt J. K. (2009). Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey. International Journal of Adhesion & Adhesives 29(3), 319-330.

[87] Da Silva L., F., M., Lima R., F., T., Teixeira R., M., S., Puga A., Closed-form solutions for the adhesively bonded joints, Universidade do Porto.

[88] Campilho R. (2017). Strength prediction of adhesively-bonded joints, A Science Publisher Book, CRC Press.

[89] Ojalvo I. U., Eidinoff H. L. (1978). Bond thickness effects upon stresses in single-lap adhesive joints, Aeronautics and Astronautics 16(3).

[90] Allman D. J., A theory for elastic stresses in adhesive bonded lap joints, Mechanics and Applied Mathematics 30, 1977, 415–436.

[91] Tsai M. Y., Oplinger D. W., Morton J. (1998). Improved theoretical solutions for adhesive lap joints, International Journal of Solids and Structures 35(12), 1163-1185.

[92] Goland M., Reissner E. (1944)., The stresses in cemented joints, Journal of Applied Mechanics 66, A17-A27.

[93] Chen D., Cheng S. (1983). An analysis of adhesive-bonded single-lap joints, Journal of Applied Mechanics 50(1), 109-115.

[95] Godzimirski J. (1988). Analiza wytrzymałości połączeń klejowych elementów metalowych obciążonych statycznie. Rozprawa habilitacyjna. WAT, Warszawa.

[96] Godzimirski J. (1985). Określanie naprężeń w spoinach klejowych metodą elementów skończonych. Biul. WAT 399(1985)11, 77-81.

- [97] Kotlarz W. (1996). Analiza wpływu temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych. Rozprawa doktorska. WAT Warszawa.
- [98] Godzimirski J., Kotlarz W. (1993). Dobór modelu siatki elementów skończonych do obliczeń połączenia klejowego pakietem programów System WAT-KM. Biul. WAT 494(1993)10, 121-127.
- [99] Gutkowski R. M., Conrad J., Pellicane P. J. (1996). Formulation of a bondline element for modeling glued joints in wood. *Mechanika Teoretyczna i Stosowana* 34(1996)1, 101- 128.
- [100] Jakubowicz A., Orłoś Z. (1966). Wytrzymałość materiałów. WNT, Warszawa.
- [101] Kocańda S., Szala J. (1985). Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Warszawa: PWN Warszawa.
- [102] Adams R.D. (2005). Adhesive bonding. Science, technology and applications. Cambridge: Woodhead Publishing.
- [103] You M, Zheng Y, Zheng X-L, et al. (2003). Effect of metal as part of fillets on the tensile shear strength of adhesively bonded single lap joints. *Int J Adhes Adhes*; 23(5):365–9.
- [104] You M, Zheng Y, Zheng X-L, et al. (2006). Failure analysis of adhesively bonded single lap joints embedded with metal component as part of fillet. *Key Eng Mater*; 324–325:727–30.
- [105] Avila AF, De Bueno PO. (2004). Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites. *Int J Adhes Adhes*; 24(5):407–14.
- [106] Belingardi G, Goglio L, Tarditi A. (2002). Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints. *Int J Adhes Adhes*; 22(4):273–82.
- [107] Hildebrand M. (1994). Non-linear analysis and optimization of adhesively bonded single lap joints between fibre-reinforced plastics and metals. *Int J Adhes Adhes*; 14(4):261–7.
- [108] Kong F-R, You M, Zheng X-L, et al. (2007). Three-dimensional stress analysis of adhesive-bonded joints under cleavage loading. *Int J Adhes Adhes*; 27(4):298–305.
- [109] Fitton MD, Broughton JG. (2005). Variable modulus adhesives: an approach to optimized joint performance. *Int J Adhes Adhes*; 25(4):329–36.
- [110] You M, Yan Z-M, Zheng Y, et al. (2005). Effect of fillet on bi-adhesive bonded aluminium lap joints. *Trans Nonferrous Met Soc China*; 15(S3):344–8
- [111] Objois A, Fargette B, Gilibert Y. (2000). The influence of the bevel angle on the micro-mechanical behaviour of bonded scarf joints. *J Adhes Sci Technol*; 14(8):1057–70.
- [112] Vallee T, Keller T. (2006). Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part III: Effects of chamfers. *Composites B: Eng*; 37(4/5):328–36.

- [113] Godzimirski J., Komorek A., Komorek Z. (2005). Badania trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych, Biul. WAT, 5-6, Warszawa.
- [114] Komorek A. (2008). Badania trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa.
- [115] Adams R. D., Mallick V. (1992) A method for the stress analysis of lap joints, The Journal of Adhesion 38 (3-4), 199-217.
- [116] Zhao, J., Zhu, N. i Lu, S.L. (2009). Productivity model in hot and humid environment based on heat tolerance time analysis. Building and Environment, 44, 2202-2207.
- [115] Norma europejska EN 10025-2:2004 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Techniczne warunki dostawy dla niestopowych stali konstrukcyjnych.
- [116] Polska norma PN-EN 10027-1:2007 Systemy oznaczania stali. Część 1: Znaki stali.
- [117] Polska norma PN-EN 10027-2:1994 Systemy oznaczania stali. System cyfrowy.
- [118] Norma europejska EN 573-3:2019 Aluminium i stopy aluminium – Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie. Część 3: Skład chemiczny i rodzaje wyrobów.
- [119] Kubit A., Macek W., Zielecki W., Szawara P., Myśliwiec P.920249. Experimental study of the impact of notches and holes made in the front edge of adherends on the properties of static and fatigue strength of adhesive joints. International Journal of Adhesion and Adhesives -Vol. 129.
- [120] PN EN-ISO 25178-2:2012E Specyfikacja geometrii wyrobów: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [121] Kłonica M., Kuczmaszewski J. (2012) Badania skuteczności klejenia stopu tytanu Ti6Al4V i stali nierdzewnej 0H18N9. Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. 651-662.
- [122] Rudawska A. (2008) Swobodna energia powierzchniowa i struktura geometryczna powierzchni wybranych kompozytów epoksydowych. Polimery, 53, 452-456.
- [123] Rudawska A. (2008) Adhesive properties of polymer composites after selected surface treatment. The 13th bi-annual conference on Polymeric Materials, 24-26, Halle/Saale w Saxony-Anhalt, Niemcy.
- [124] Żenkiewicz M. (2000) Adhezja I modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. WNT, Warszawa.
- [125] Hazlett R.D. (1992) On surface roughness effects in wetting phenomena. Journal of Adhesion Science and Technology, 6, 625-633.

## Spis rysunków

Rys. 1. 1. Siły adhezji i kohezji w złączu klejowym [21] .....	9
Rys. 1. 2. Mechanizm zniszczenia adhezyjnego połączeń klejowych [21].....	11
Rys. 1. 3. Mechanizm zniszczenia kohezyjnego połączeń klejowych [21].....	12
Rys. 1. 4. Rozkład naprężenia stycznego $\tau$ w spoinie klejowej połączeń obciążonych na sciąganie w zależności od długości zakładki l: a) długość zakładki mniejsza niż graniczna; b) długość zakładki równa długości granicznej; c) długość zakładki większa niż graniczna; gdzie: $\tau$ – naprężenie styczne, $\tau_{sr}$ – średnie naprężenie styczne; $l_1, l_2, l_3$ – długość zakładki, $l_{gr}$ – graniczna długość zakładki [25].....	14
Rys. 1. 5. Deformacja w złączu jednozakładkowym ze sztywnymi elementami łączonymi [30] .....	14
Rys. 1. 6. Rozkład naprężeń stycznych w spoinie klejowej na długości zakładki [33] .....	15
Rys. 1. 7. Deformacje w jednozakładkowym złączu klejowym ze sprężystymi elementami łączonymi [30].....	16
Rys. 1. 8. Naprężenia w przekroju złącza według teorii Volkersena [30] .....	16
Rys. 1. 9. Model odkształcenia zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie, P – siła, $\gamma$ – kąt odkształcenia spoiny klejowej, $\delta_1, \delta_2$ – grubość klejonych elementów, $\delta_k$ – grubość spoiny klejowej [44] .....	19
Rys. 1. 10. Obciążenie elementarnego wycinka zakładkowego połączenia klejowego o długości 1, $\sigma_{01}, \sigma_{02}$ – naprężenia normalne występujące w elemencie klejonym poza spoiną, $\delta_1, \delta_2$ – grubości klejonych elementów, $\delta_k$ – grubość spoiny, $\sigma(x)$ – naprężenia normalne w elemencie klejonym w przekroju x [43] .....	20
Rys. 1. 11. Obciążenie fragmentu zakładkowego połączenia klejowego $\sigma_0$ – naprężenia występujące w elemencie klejonym poza spoiną, $\sigma_x$ – naprężenia występujące w elementach klejonych na odcinku spoiny w przekroju x [43] .....	21
Rys. 1. 12. Rozkład naprężeń stycznych wzdłuż spoiny zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie, dwa elementy o różnej grubości, sztywności [44].....	22
Rys. 1. 13. Porównanie rozkładów naprężeń stycznych na długości zakładki [85].....	24
Rys. 1. 14. Nomogram nośności jedno zakładkowego połączenia blach stalowych o grubości $\delta=1$ [mm], grubości spoiny klejowej $\delta_k=0,1$ [mm], parametr $Rq=1,7$ [ $\mu\text{m}$ ], klejonych klejem Epidian 57/PAC/100:80 [26].....	25

Rys. 1. 15. Zależność wytrzymałości (P) zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie od długości zakładki (l) i grubości ( $\delta$ ) elementów klejonych [5] .....	25
Rys. 1. 16. Zależność średnich naprężeń stycznych $\tau_{sr}$ w spoinie zakładkowego połączenia klejowego obciążonego siłą P od długości zakładki l [44] .....	26
Rys. 1. 17. Wpływ grubości łączonych elementów $\delta$ ( $g_m$ ) na wytrzymałości na ścinanie $R_t$ , klej E5/Z-1/10:1 [28] .....	27
Rys. 1. 18. Charakter zależności wytrzymałości na ścinanie lub oddzieranie połączenia klejowego od grubości spoiny, przy założeniu niezależności naprężeń niszczących od jej grubości $\tau_n \neq f(\delta_k)$ [48].....	28
Rys. 1. 19. Zależność wytrzymałości P zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie od wartości modułu sprężystości E klejonych elementów .....	29
Rys. 1. 20. Porównanie rozkładów naprężeń stycznych w spoinie zakładkowego połączenia klejowego obliczonych metodami: Volkersena (V), Adamsa (A), Golanda-Reisnera (G-R)..	30
Rys. 1. 21. Rozkład naprężeń stycznych w spoinach zakładkowego połączenia klejowego jednakowo obciążonych przy: 1 – sprężystych odkształceniach obu elementów klejonych, 2 – przekroczeniu granicy plastyczności w elementach klejonych [46].....	30
Rys. 1. 22. Porównanie rozkładów naprężeń stycznych zakładkowego połączenia klejowego wybranych modeli analitycznych [88].....	33
Rys. 1. 23. Porównanie rozkładów naprężeń normalnych zakładkowego połączenia klejowego wybranych modeli analitycznych [88].....	34
Rys. 1. 24. Wartości naprężenia dla wybranych materiałów dla wybranych rodzajów klejów [35].....	35
Rys. 1. 25. Porównanie wytrzymałości na odrywanie klejowych mas regeneracyjnych zastosowanych do łączenia różnych stopów metalicznych.....	36
Rys. 1. 26. Zależność wytrzymałości zakładkowych połączeń klejowych klejonych klejem Epidian 57/PAC/100:80 od grubości spoiny klejowej dla $l=12$ [mm], $\delta=2$ [mm], $Rq=2$ [ $\mu m$ ] [37].....	37
Rys. 1. 27. Krzywa termomechaniczna tworzywa zbudowanego z makrocząsteczek o małej gęstości usieciowania, $T_z$ – temperatura zeszklenia, $T_r$ – temperatura rozkładu, $\epsilon$ – odkształcenie względne [44].....	38

Rys. 1. 28. Krzywe rozciągania materiału lepkosprężystego dla dwóch różnych prędkości odkształcenia, $\sigma$ – naprężenie, $\varepsilon$ – odkształcenie względne, $V_e$ – prędkość odkształcenia [44] .....	39
Rys. 1. 29. Model Burgersa ciała liniowo lepkosprężystego, ( $E_A$ , $E_C$ , $\eta_B$ , $\eta_D$ – współczynniki lepkosprężystości) [45].....	39
Rys. 1. 30. Zależność wytrzymałości P połączeń klejowych obciążonych na ścinanie od prędkości v przesuwu uchwytych maszyny wytrzymałościowej [46] .....	39
Rys. 1. 31. Krzywe rozciągania klejów o różnych właściwościach mechanicznych, A – klej konstrukcyjny, B – klej konstrukcyjny wzmocniony, C – klej konstrukcyjny wzmocniony, D – klej w stanie elastycznym, $\sigma$ – naprężenie, $\varepsilon$ – odkształcenie względne [43] .....	41
Rys. 1. 32. Rozkład naprężenia stycznego wzdłuż długości zakładki: $E_k=3500$ [MPa], $E=2,1 \times 10^5$ [MPa], $\delta=2$ [mm], $l=25$ [mm], $P=2700$ [N], $\tau_u=5,4$ [MPa], 1-połączenie bez wypływki, 2-połączenie z wypływką [27].....	42
Rys. 1. 33. Wpływ sposobu przygotowania powierzchni blach gatunku 2024T4 na wytrzymałość na ścinanie klejowej masy regeneracyjnej Belzona 1221: A – schropowacenie papierem ściernym nr 150 i mycie benzyną, B – schropowacenie papierem ściernym nr 150 i mycie odtłuszczaczem firmowym, C – piaskowanie gruboziarnistym elektrokorundem i mycie odtłuszczaczem firmowym, D piaskowanie drobnoziarnistym elektrokorundem i mycie odtłuszczaczem firmowym, E – piaskowanie gruboziarnistym elektrokorundem za pomocą pistoletu laboratoryjnego i mycie odtłuszczaczem firmowym, F – piaskowanie drobnoziarnistym elektrokorundem za pomocą pistoletu laboratoryjnego i mycie odtłuszczaczem firmowym, G – trawienie zgodnie z PN-69/C- 89300[68].....	43
Rys. 1. 34. Wpływ rodzaju zastosowanego środka odłuszczonego na wytrzymałość na ścinanie klejowych mas regeneracyjnych (blachy stalowe piaskowane) [67] .....	45
Rys. 1. 35. Wpływ ukosowania końców zakładki na wytrzymałość połączenia zakładkowego na ścinanie [35].....	46
Rys. 1. 36. Sposób kształtowania klejonego elementu połączenia zakładkowego przy ukosowaniu wzdłuż zakładki.....	47
Rys. 1. 37. Wpływ podcięcia na wytrzymałość połączenia zakładkowego .....	47
Rys. 1. 38. Porównanie wytrzymałości zmęczeniowej na ścinanie próbek zakładkowego połączenia klejowego ze stopu aluminium [76] .....	50

Rys. 1. 39. Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość zmęczeniową na oddzieranie $Z_{od}$ kompozycji klejowych [77].....	51
Rys. 1. 40. Porównanie statycznej $R_t$ i zmęczeniowej $Z_t$ wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych wykonanych ze stali 30HGSA i stopu aluminium PA7T4, sklejonych klejem ME1 [81].....	51
Rys. 1. 41. Porównanie trwałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejowych ze stopu aluminium, BW – bez wypływki, WK – z wypływką [81,82].....	51
Rys. 1. 42. Cykl naprężeń zmęczeniowych [84].....	54
Rys. 1. 43. Rodzaje obciążeń najczęściej stosowanych w badaniach zmęczeniowych zakładkowych połączeń klejowych na ścinanie [84].....	54
Rys. 1. 44. Zależność trwałości połączeń jednozakładkowych ze stopu aluminium, utwardzonych w czasie 1 h w temperaturze 60°C od amplitudy naprężeń.....	55
Rys. 1. 45 Krzywa Wöhlhera, pełny (po lewej) i uproszczony (po prawej) wykres z zaznaczonymi zakresami wytrzymałości zmęczeniowej [101].....	57
Rys. 1. 46 Rozkład naprężeń w górnej warstwie spoiny klejowej próbki zakładkowej wyznaczonej MES [95].....	60
Rys 3. 1. Model geometryczny jednozakładkowego połączenia klejowego opracowany na potrzeby analizy MES – wariant bazowy[opracowanie własne] .....	70
Rys 3. 2. Model geometryczny jednozakładkowego połączenia klejowego opracowany na potrzeby analizy MES – wariant z wcięciami [opracowanie własne] .....	70
Rys 3. 3. Model geometryczny jednozakładkowego połączenia klejowego opracowany na potrzeby analizy MES – wariant z otworami [opracowanie własne].....	70
Rys 3. 4. Przykład elementu 8-węzłowej siatki CHEXA(8) [opracowanie własne].....	72
Rys 3. 5. Przykład elementu 4-węzłowej siatki CQUAD(4) [opracowanie własne] .....	73
Rys 3. 6. Fragment modelu blachy z wcięciami a) powierzchni siatki 2D b) siatka 3D typu CHEXA (8) [opracowanie własne] .....	73
Rys 3. 7. Utwierdzenie węzłów siatki na końcu blachy [opracowanie własne] .....	74
Rys 3. 8. Drugi koniec modelu, elementy niebieskie reprezentują odebranie 5 stopni swobody, elementy czerwone reprezentują obciążenie w postaci siły [opracowanie własne].....	75
Rys 3. 9. Model symulacji z określonymi połączeniami. Żółte elementy reprezentują połączenia typu „contact” [opracowanie własne] .....	76

Rys 3. 10. Porównanie wariantów naprężeń von Missesa w spoinie jednozakładowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stali [opracowanie własne].....	85
Rys 3. 11. Porównanie wariantów naprężeń normalnych w spoinie jednozakładowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stali [opracowanie własne].....	86
Rys 3. 12. Porównanie wariantów naprężeń stycznych w spoinie jednozakładowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stali [opracowanie własne].....	86
Rys 3. 13. Porównanie wariantów naprężeń von Missesa w spoinie jednozakładowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stopu aluminium [opracowanie własne] .....	87
Rys 3. 14. Porównanie wariantów naprężeń normalnych w spoinie jednozakładowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stopu aluminium [opracowanie własne] .....	87
Rys 3. 15. Porównanie wariantów naprężeń stycznych w spoinie jednozakładowych połączeń klejowych dla próbek wykonanych ze stopu aluminium [opracowanie własne] .....	88
Rys. 4. 1. Maszyna wytrzymałościowa Zwick/Roell Z100 [opracowanie własne].....	92
Rys. 4. 2. Maszyna do badań zmęczeniowych HT-9711 (Hung Ta Instrument Co., Taichung City, Tajwan) [opracowanie własne].....	93
Rys. 4. 3. Tubka kleju Araldite 2014-2 .....	97
Rys. 4. 4. Urządzenie do obróbki strumieniowo ścierniej [opracowanie własne].....	98
Rys. 4. 5. Przyrząd do klejenia z próbkami [opracowanie własne].....	99
Rys. 4. 6. Stanowisko do pomiaru SGP [opracowanie własne] .....	101
Rys. 4. 7. Stanowisko do pomiaru kąta zwilżenia [opracowanie własne].....	104
Rys. 4. 8. Schemat jednozakładowego połączenia klejowego w wariacie bazowym [opracowanie własne].....	105
Rys. 4. 9. Położenie próbki połączenia klejowego w szczękach maszyny wytrzymałościowej [opracowanie własne].....	110
Rys. 4. 10. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariacie SWD, szerokość 3 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne].....	118
Rys. 4. 11. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariacie SWS, szerokość 2 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne].....	118

Rys. 4. 12. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariacie SWM, szerokość 1 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne] .....	119
Rys. 4. 13. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z otworami w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne] .....	119
Rys. 4. 14. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ścianie dla rozpatrywanych wariantów z wcięciami próbek ze stali [opracowanie własne] .....	122
Rys. 4. 15. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ścianie dla rozpatrywanych wariantów z otworami dla próbek stalowych [opracowanie własne] .....	122
Rys. 4. 16. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariacie AWD, szerokość 3 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne] .....	130
Rys. 4. 17. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariacie AWS, szerokość 2 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne] .....	131
Rys. 4. 18. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z wcięciami w wariacie AWM, szerokość 1 mm, w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne] .....	132
Rys. 4. 19. Wykres reprezentatywnych krzywych naprężenia ścinającego w funkcji przemieszczenia połączeń klejowych z otworami AO w stosunku do wariantu bazowego [opracowanie własne] .....	133
Rys. 4. 20. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ścianie dla rozpatrywanych wariantów z wcięciami próbek ze stopu aluminium [opracowanie własne] .....	134
Rys. 4. 21. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ścianie dla rozpatrywanych wariantów z otworami próbek ze stopu aluminium [opracowanie własne] .....	135
Rys. 4. 22. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami średnimi o długości 2 mm [opracowanie własne] .....	136
Rys. 4. 23. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami średnimi o długości 4 mm [opracowanie własne] .....	137
Rys. 4. 24. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu podstawowego [opracowanie własne] .....	137

Rys. 4. 25. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z otworami o średnicy 3 mm [opracowanie własne] .....	137
Rys. 4. 26. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami szerokimi o długości 3 mm [opracowanie własne] .....	138
Rys. 4. 27. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami szerokimi o długości 4 mm [opracowanie własne] .....	139
Rys. 4. 28. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami wąskimi o długości 1 mm [opracowanie własne] .....	139
Rys. 4. 29. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z wcięciami wąskimi o długości 3 mm [opracowanie własne] .....	140
Rys. 4. 30. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z otworami o średnicy 2 mm [opracowanie własne] .....	141
Rys. 4. 31. Powierzchnie pęknięć jednowarstwowych złączy klejonych dla wariantu z otworami o średnicy 4 mm [opracowanie własne] .....	141
Rys. 4. 32. Wykres Boxplot obrazujący wpływ średnicy wykonanego otworu na wytrzymałość połączeń klejowych dla próbek stalowych [opracowanie własne] .....	158
Rys. 4. 33. Wykres Boxplot obrazujący wpływ średnicy wykonanego otworu na wytrzymałość połączeń klejowych dla próbek ze stopu aluminium [opracowanie własne] .....	158
Rys. 5. 1. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z wcięciami szerokimi SWD o długości 3 mm [opracowanie własne] .....	167
Rys. 5. 2. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z wcięciami średnimi SWS o długości 3 mm [opracowanie własne] .....	167
Rys. 5. 3. Porównanie krzywych zmęczenia dla złączy wariantu bazowego z wariantem z wcięciami wąskimi SWM o długości 1 mm [opracowanie własne] .....	168
Rys. 5. 4. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z otworami $\varnothing$ 2 mm SO [opracowanie własne] .....	168
Rys. 5. 5. Schemat mechanizmu pęknięcia zmęczeniowego połączenia klejowego dla złącza bez modyfikacji, z wykonanymi wcięciami oraz z wykonanymi otworami [119] .....	171
Rys. 5. 6. Skaningowy mikroskop elektronowy PhenomProX [opracowanie własne] .....	172
Rys. 5. 7. Powierzchnie pęknięć jednozakładowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego próbek ze stali S235JR [opracowanie własne] .....	174

Rys. 5. 8. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariacie z wcięciami średnimi o szerokości 2 mm i długości 4 mm próbek ze stali S235JR [opracowanie własne] .....	175
Rys. 5. 9. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariacie z otworami o średnicy 2 mm próbek ze stali S235JR [opracowanie własne].....	176
Rys. 5. 10. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z wcięciami szerokimi AWD o długości 4 mm [opracowanie własne] .....	185
Rys. 5. 11. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z wcięciami średnimi AWS o długości 4 mm [opracowanie własne].....	185
Rys. 5. 12. Porównanie krzywych zmęczenia dla złączy wariantu bazowego z wariantem z wcięciami wąskimi AWM o długości 2 mm [opracowanie własne].....	186
Rys. 5. 13. Porównanie krzywych zmęczenia wariantu bazowego z wariantem z otworami o średnicy 2 mm AO [opracowanie własne].....	186
Rys. 5. 14. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariacie bazowym dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 [opracowanie własne] .....	188
Rys. 5. 15. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariacie z wcięciami szerokimi o szerokości 3 mm i długości 3 mm próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 [opracowanie własne].....	189
Rys. 5. 16. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariacie z wcięciami średnimi o szerokości 2 mm i długości 4 mm ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 [opracowanie własne].....	190
Rys. 5. 17. Powierzchnie pęknięć jednozakładkowego połączenia klejowego w wariacie z otworami o średnicy 4 mm ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 [opracowanie własne]	190

## Spis tabel

Tab.1. 1. Wyniki badań wpływu kąta ukosowania blach połączeń zakładkowych [72] .....	46
Tab. 3. 1 Wprowadzone parametry materiałowe dla kleju.....	71
Tab. 3. 2. Wprowadzone parametry materiałowe dla stali .....	72
Tab. 3. 3. Wprowadzone parametry materiałowe dla stopu aluminium.....	72
Tab. 3. 4. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami szerokimi próbki ze stali SWD o szerokości 3 mm długości 3 mm....	77
Tab. 3. 5. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami średnimi próbki ze stali SWS o szerokości 2 mm długości 1 mm .....	78
Tab. 3. 6. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami wąskimi próbki ze stali SWM o szerokości 1 mm długości 4 mm .....	79
Tab. 3. 7. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z otworami próbki ze stali SO o średnicy 2 mm .....	80
Tab. 3. 8. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami szerokimi próbki ze stopu aluminium AWD o szerokości 3 mm długości 1 mm.....	81
Tab. 3. 9. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami średnimi próbki ze stopu aluminium AWS o szerokości 2 mm długości 3 mm.....	82
Tab. 3. 10. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z wcięciami wąskimi próbki ze stopu aluminium AWM o szerokości 1 mm długości 2 mm .....	83
Tab. 3. 11. Rozkład naprężeń jednozakładkowego połączenia klejowego dla wariantu bazowego i wariantu z otworami próbki ze stopu aluminium AO o średnicy 4 mm .....	84
Tab. 3. 12. Maksymalne wartości naprężeń w spoinach jednozakładkowych połączeń klejowych dla wybranych wariantów próbek ze stali.....	88
Tab. 3. 13. Maksymalne wartości naprężeń w spoinach jednozakładkowych połączeń klejowych dla wybranych wariantów próbek ze stopu aluminium. ....	88
Tab. 4. 1 Skład chemiczny stali S235JR zgodnie z EN 10025-2:2004 [115].....	94

Tab. 4. 2. Właściwości mechaniczne stali S235JR zgodnie z EN 10025-2:2004 [115] .....	94
Tab. 4. 3. Właściwości fizyczne stali S235JR zgodnie z EN 10025-2:2004 [115] .....	94
Tab. 4. 4. Skład chemiczny stopu EN AW 2024 zgodnie z PN-EN 573-3:2019-12 [118].....	96
Tab. 4. 5. Właściwości mechaniczne stopu aluminium EN AW-2024 zgodnie z PN-EN 573-3:2019-12 [118].....	96
Tab. 4. 6. Właściwości fizyczne stopu aluminium EN AW-2024 zgodnie z PN-EN 573-3:2019-12 [118].....	96
Tab. 4. 7. Wyniki SGP dla stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz stali S235JR po piaskowaniu .....	102
Tab. 4. 8. Średnie wartości swobodnej energii powierzchniowej dla stopu EN AW 2024-T3 oraz stali S235JR po obróbce strumieniowo-ściernej .....	104
Tab. 4. 9. Wymiary zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych dla wariantu z wcięciami szerokimi.....	106
Tab. 4. 10. Wymiary zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych dla wariantu z wcięciami średnimi.....	107
Tab. 4. 11. Wymiary zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych dla wariantu z wcięciami wąskimi.....	108
Tab. 4. 12. Wymiary zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych dla wariantu z otworami .....	109
Tab. 4. 13. Wybrane próbki w wariacie podstawowym po zniszczeniu .....	111
Tab. 4. 14. Wybrane próbki w wariacie z wcięciami szerokimi po zniszczeniu .....	111
Tab. 4. 15. Wybrane próbki w wariacie z wcięciami średnimi po zniszczeniu .....	111
Tab. 4. 16. Wybrane próbki w wariacie z wcięciami wąskimi po zniszczeniu .....	112
Tab. 4. 17. Wybrane próbki w wariacie z otworami po zniszczeniu .....	112
Tab. 4. 18. Tabela wyników dla wariantu bazowego.....	113
Tab. 4. 19. Tabela wyników badań próbek ze stali dla wariantu pierwszego z wcięciami szerokimi o szerokości 3 mm (wariant SWD) .....	114
Tab. 4. 20. Tabela wyników badań dla próbek ze stali w wariacie drugim z wcięciami średnimi o szerokości 2 mm (wariant: SWS).....	115
Tab. 4. 21. Tabela wyników badań dla wariantu trzeciego z wcięciami wąskimi o szerokości 1 mm (wariant: SWM) próbek ze stali.....	116

Tab. 4. 22. Tabela wyników badań próbek połączeń ze stali dla wariantu z otworami (wariant: SO).....	117
Tab. 4. 23. Wybrane próbki w wariacie podstawowym po zniszczeniu .....	123
Tab. 4. 24 Wybrane próbki w wariacie z wcięciami szerokimi po zniszczeniu.....	124
Tab. 4. 25. Wybrane próbki w wariacie z wcięciami średnimi po zniszczeniu.....	124
Tab. 4. 26. Wybrane próbki w wariacie z wcięciami wąskimi po zniszczeniu.....	124
Tab. 4. 27. Wybrane próbki w wariacie z otworami po zniszczeniu.....	125
Tab. 4. 28. Wyniki badań dla wariantu bazowego .....	125
Tab. 4. 29 Wyniki badań dla próbek ze stopu aluminium wariantu pierwszego z wcięciami o szerokości 3 mm (wariant: AWD).....	126
Tab. 4. 30. Wyniki badań dla próbek ze stopu aluminium w wariacie drugim z wcięciami średnimi o szerokości 2 mm (wariant: AWS) .....	127
Tab. 4. 31. Wyniki badań dla próbek ze stopu aluminium w wariacie trzecim z wcięciami wąskimi o szerokości 1 mm (wariant: AWM).....	128
Tab. 4. 32. Wyniki badań dla próbek ze stopu aluminium w wariacie z otworami (wariant: AIO).....	129
Tab. 4. 33. Wartości średnie p-value dla rozpatrywanych wariantów z wcięciami próbek ze stali S235JR .....	142
Tab. 4. 34. Wartości średnie p-value dla wariantów z otworami próbek ze stali S235JR .....	143
Tab. 4. 35. Wartości średnie p-value dla rozpatrywanych wariantów z wcięciami próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 .....	143
Tab. 4. 36. Wartości średnie p-value dla wariantów z otworami próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 .....	144
Tab. 4. 37. Test ANOVA średnich wartości nośności w zależności od szerokości wykonanego wcięcia dla próbek ze stali S235JR .....	145
Tab. 4. 38. Test ANOVA średnich wartości nośności w zależności od długości wykonanego wcięcia dla próbek ze stali S235JR .....	145
Tab. 4. 39. Test ANOVA średnich wartości nośności w zależności od średnicy otworów wykonanych w próbkach ze stali S235JR .....	146
Tab. 4. 40. Test ANOVA średnich wartości nośności w zależności od szerokości wykonanego wcięcia dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 .....	146

Tab. 4. 41. Test ANOVA średnich wartości nośności w zależności od długości wykonanego wcięcia dla próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 .....	147
Tab. 4. 42. Test ANOVA średnich wartości nośności w zależności od średnicy otworów wykonanych w próbkach ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 .....	148
Tab. 4. 43. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek stalowych określająca wpływ parametru szerokości wcięcia na nośność złącza klejowego. ....	150
Tab. 4. 44. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek stalowych określająca wpływ parametru długości wcięcia na nośność złącza klejowego .....	151
Tab. 4. 45. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek stalowych określająca wpływ parametrów szerokości i długości wcięcia na nośność złącza klejowego.....	152
Tab. 4. 46. Analiza regresji liniowej wariantu z otworami dla próbek stalowych określająca wpływ wymiaru średnicy otworu na nośność złącza klejowego .....	153
Tab. 4. 47. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek aluminiowych określająca wpływ parametru szerokości wcięcia na nośność złącza klejowego .....	154
Tab. 4. 48. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek ze stopu aluminium określająca wpływ parametru długości wcięcia na nośność złącza klejowego .....	155
Tab. 4. 49. Analiza regresji liniowej wariantu z wcięciami dla próbek ze stopu aluminium określająca wpływ parametrów szerokości i długości wcięcia na nośność złącza klejowego	156
Tab. 4. 50. Analiza regresji liniowej wariantu z otworami dla próbek aluminiowych określająca wpływ wymiaru średnicy otworu na nośność złącza klejowego .....	157
Tab. 5. 1. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia bazowego.....	160
Tab. 5. 2. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami szerokimi w wariancie SWD.....	161
Tab. 5. 3. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami średnimi w wariancie SWS .....	162
Tab. 5. 4. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami wąskimi w wariancie SWM .....	163
Tab. 5. 5. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia z otworami w wariancie SO .....	165
Tab. 5. 6. Wyniki badań zmęczeniowych i analiza statyczna dla połączenia bazowego.....	178

Tab. 5. 7. Wyniki badań zmęzeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami szerokimi w wariancie AWD .....	179
Tab. 5. 8. Wyniki badań zmęzeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami średnimi w wariancie AWS .....	180
Tab. 5. 9. Wyniki badań zmęzeniowych i analiza statyczna dla połączenia z wcięciami wąskimi w wariancie AWM .....	181
Tab. 5. 10. Wyniki badań zmęzeniowych i analiza statyczna dla połączenia z otworami w wariancie AO .....	184

## Streszczenie

Rozprawa doktorska podejmuje zagadnienie analizy wpływu zmian geometrycznych przy czołowej krawędzi elementów łączonych na właściwości statyczne i zmęczeniowe konstrukcyjnych połączeń klejowych blach ze stali S235JR oraz stopu aluminium EN AW-2024-T3. Tematyka rozprawy została przyjęta w odpowiedzi na potrzebę opracowania łatwej, skutecznej metody, która zapewniłaby efektywny przyrost właściwości wytrzymałościowych, a w szczególności zmęczeniowych.

Celem wstępnego potwierdzenia hipotezy o możliwości poprawy nośności poprzez wprowadzenie modyfikacji konstrukcyjnych połączeń, zrealizowano analizę numeryczną przy użyciu metody elementów skończonych (MES). Symulacje przeprowadzono z zastosowaniem programu NX Simcenter. Wykazano, że rozpatrywane modyfikacje geometrii wprawdzie nie prowadzą do redukcji maksymalnych wartości naprężeń, jednak wywołują zmianę charakteru rozkładu naprężeń w obszarze spoiny klejowej. Spiętrzenia naprężeń lokalnie są odsuwane od czołowej krawędzi połączenia na skutek oddziaływania geometrii wcięć i otworów.

W ramach badań eksperymentalnych przygotowano próbki jednozakładkowych połączeń klejowych w wariacie bazowym tj. bez modyfikacji oraz w wariantach z modyfikacjami geometrii. Modyfikacje polegały na wykonaniu wcięć lub otworów o różnych wymiarach przy czołowej krawędzi łączonych blach. Bezpośrednio przed wykonaniem połączeń zrealizowano analizę powierzchni klejonych określając parametry chropowatości, a także wielkość energii powierzchniowej. Połączenia wykonano przy użyciu chemoutwardzalnego kleju epoksydowego do metali Araldite 2014-2.

Próbki w pierwszej kolejności poddano badaniom wytrzymałości statycznej w warunkach ścinania dokonując analizy porównawczej dla poszczególnych wariantów. Wykazano możliwość poprawy właściwości statycznych dla wybranych wariantów. Dla połączeń blach stalowych, w przypadku wariantu z wcięciami o szerokości 3 mm i długości 1 mm doszło do wzrostu wytrzymałości o 13,48% w stosunku do wariantu bazowego. Z kolei największy przyrost wytrzymałości w przypadku połączeń elementów ze stopu aluminium odnotowano dla wariantu z wcięciami o szerokości i długości 2 mm. W odniesieniu do wariantu bazowego przyrost wyniósł 8,77%. Jednocześnie należy zaznaczyć, że w przypadku większości wariantów z modyfikacjami nie wykazano istotnej poprawy wytrzymałości statycznej.

Ponadto, korzystając z metod statystycznych (jednoczynnikowej analizy wariancji i analizy regresji), przeanalizowano zależności między nośnością połączeń klejowych w wersji podstawowej a tych poddanych modyfikacją konstrukcyjnym. Analizy statystyczne wykazały, że w odniesieniu do wytrzymałości statycznej zastosowane modyfikacje nie mają istotnego wpływu.

W kolejnym etapie prac zrealizowano badania wytrzymałości zmęczeniowej dokonując analizy porównawczej dla wybranych wariantów połączeń. Wykazano, że wszystkie rozważane modyfikacje konstrukcyjne mają bardzo pozytywny wpływ na trwałość zmęczeniową połączeń.

W obszarze wysokocyklowego zmęczenia dla próbek połączeń elementów stalowych przy maksymalnej wartości obciążenia zmiennego równej 9 MPa wykazano przyrost średniej trwałości zmęczeniowej 275% dla wariantu z wcięciami o szerokości 1 mm. W tym przypadku średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $1539,576 \times 10^3$  cykli podczas gdy dla wariantu bazowego  $410,516 \times 10^3$  cykli. Również dla wariantu z otworami przy krawędzi wykazano wzrost średniej trwałości zmęczeniowej do wartości  $1162,916 \times 10^3$  co stanowi przyrost o 83,3% w odniesieniu do wariantu bazowego. Przechodząc do próbek połączeń elementów ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, przy wysokocyklowym zmęczeniu dla wariantu z wcięciami o szerokości 3 mm, przy maksymalnym poziomie obciążenia zmiennego o wartości równej 6,5 MPa wykazano przyrost średniej trwałości zmęczeniowej o 560,4% w stosunku do wariantu bazowego. Dla połączeń modyfikowanych średnia trwałość zmęczeniowa wyniosła  $1209,089 \times 10^3$  cykli, z kolei dla wariantu bazowego  $183,093 \times 10^3$  cykli.

Przedstawione w rozprawie wyniki badań pozwoliły na udowodnienie hipotezy postawionej w pracy, zgodnie z którą zastosowanie perforacji oraz wcięć w strefie przykrawędziowej jednozakładkowego połączenia klejowego blach ze stali S235JR oraz ze stopu aluminium EN AW 2024-T3 w wybranych przypadkach umożliwia poprawę wytrzymałości statycznej połączeń. Natomiast w odniesieniu do wyników badań zmęczeniowych należy podkreślić, że każda z zastosowanych modyfikacji wpływa na znaczący przyrost trwałości zmęczeniowej.

## Summary

The doctoral dissertation addresses the issue of analyzing the impact of geometric changes at the leading edge of joined elements on the static and fatigue properties of structural adhesive joints of S235JR steel sheets and EN AW-2024-T3 aluminum alloy. The topic of the dissertation was chosen in response to the need to develop a simple, effective method that would ensure an effective increase in strength properties, particularly fatigue properties.

In order to preliminarily confirm the hypothesis that load-bearing capacity can be improved by modifying the structural connections, a numerical analysis was performed using the finite element method (FEM). The simulations were carried out using NX Simcenter software. It was shown that although the considered geometric modifications do not lead to a reduction in maximum stress values, they do cause a change in the nature of stress distribution in the adhesive joint area. Local stress concentrations are shifted away from the leading edge of the joint due to the influence of the geometry of the notches and holes.

As part of the experimental research, samples of single-layer adhesive joints were prepared in the base variant, i.e., without modifications, and in variants with geometric modifications. The modifications consisted of making indentations or holes of various sizes at the front edge of the joined sheets. Immediately before making the joints, an analysis of the bonded surfaces was carried out to determine the roughness parameters and the surface energy. The joints were made using Araldite 2014-2 chemically curable epoxy adhesive for metals.

The samples were first subjected to static strength tests under shear conditions, with a comparative analysis performed for each variant. The possibility of improving the static properties for selected variants was demonstrated. For steel sheet joints, in the case of the variant with 3 mm wide and 1 mm long notches, there was a 13.48% increase in strength compared to the base variant. In turn, the largest increase in strength for aluminum alloy connections was recorded for the variant with 2 mm wide and 2 mm long notches. Compared to the base variant, the increase was 8.77%. At the same time, it should be noted that in the case of most variants with modifications, no significant improvement in static strength was observed.

In addition, statistical methods (single-factor analysis of variance and regression analysis) were used to analyze the relationships between the load-bearing capacity of adhesive joints in

the basic version and those subjected to structural modifications. Statistical analyses showed that the modifications had no significant effect on static strength.

In the next stage of work, fatigue strength tests were carried out, performing a comparative analysis for selected connection variants. It was shown that all the structural modifications considered have a very positive effect on the fatigue life of the connections.

In the area of high-cycle fatigue for steel connection samples at a maximum variable load of 9 MPa, an increase in average fatigue life of 275% was demonstrated for the variant with 1 mm wide notches. In this case, the average fatigue life was  $1539.576 \times 10^3$  cycles, while for the base variant it was  $410.516 \times 10^3$  cycles. The variant with holes at the edge also showed an increase in average fatigue life to  $1162.916 \times 10^3$ , which is an increase of 83.3% compared to the base variant. Moving on to the samples of EN AW-2024-T3 aluminum alloy connections, under high-cycle fatigue for the variant with 3 mm wide notches, at a maximum variable load level of 6.5 MPa, an increase in average fatigue life of 560.4% was demonstrated in relation to the base variant. For modified joints, the average fatigue life was  $1209.089 \times 10^3$  cycles, while for the base variant it was  $183.093 \times 10^3$  cycles.

The research results presented in the dissertation proved the hypothesis put forward in the thesis, according to which the use of perforations and indentations in the edge zone of a single-lap adhesive joint of S235JR steel sheets and EN AW 2024-T3 aluminum alloy in selected cases improves the static strength of the joints. However, with regard to the fatigue test results, it should be emphasized that each of the modifications applied contributes to a significant increase in fatigue life.